

Joni Haapaniemi

**MASSIIVITIILIRAKENTEISEN ULKOSEINÄN RAKENNUSFYSI-
KAALINEN TARKASTELU**

MASSIIVITIILIRAKENTEISEN ULKOSEINÄN RAKENNUSFYSI- KAALINEN TARKASTELU

Joni Haapaniemi
Opinnäytetyö
Kevät 2018
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma, talonrakennus

Tekijä(t): Joni Haapaniemi
Opinnäytetyön nimi: Massiivitiilirakenteisen ulkoseinän rakennusfysikaalinen tarkastelu
Työn ohjaaja(t): Kimmo Illikainen
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: K 2018
Sivumäärä: 70 + 5 liitettä

Opinnäytetyössä tarkasteltiin massiivitiilirakenteisen ulkoseinärakenteen ja sen liittymien lämpö- ja kosteuskäyttäytymistä. Kohteena oli kaksi suunnitteilla olevaa asuinkerrostaloa, joiden ulkoseinärakenteena käytetään massiivista tiili-muurausta ilman erillistä lämmöneristettä. Työn tavoitteena oli tuottaa simuloinnin avulla lämpö- ja kosteustekniset laskelmat rakenteesta sekä laatia kyseiselle kohteelle rakenteiden lämmön ja suhteellisen kosteuden mittaussuunnitelma.

Ulkoseinärakenteelle ja liittymille suoritettiin lämpö- ja kosteussimuloinnit käyttäen WUFI 2D -ohjelmistoa, jolla voidaan tarkastella rakenteiden fysiikkaa perinteisiä laskentatapoja tarkemmin. Laskenta pystyttiin suorittamaan kaksiulotteisena ja siinä voitiin huomioida muuttuvat ilmasto-olosuhteet sekä rakennusmateriaalien muuttuvat materiaaliominaisuudet. Rakenteesta ja sen liittymistä tehtiin simulointimallit ohjelmaan ja laskentatuloksista valittiin tiettyjä monitorointipisteitä, joista otettiin lämmön ja suhteellisen kosteuden arvot tarkastelua varten. Pääasiallinen laskenta tehtiin rakennuksen käyttötilassa, mutta lisäksi tarkasteltiin myös hieman rakenteiden kosteuksia ja kuivumista tuotantovaiheen jälkeen. Kriittisimmille paikoille tehtiin myös homehtumisriskitarkastelu Suomessa kehitetyn homemallin avulla.

Opinnäytetyössä saatiin selvitettyä rakennusfysikaalista tietoa rakenteesta, jonka käyttö ei Suomessa ole ollut yleistä vuosikymmeniin. Saadun tiedon avulla todettiin, että rakenteet toimivat hyvin rakennuksen käyttötilanteessa. Rakenteiden kuivuminen sen sijaan näytti tarkastelun perusteella olevan hidasta ja kosteusmäärät suuria, mikä on syytä huomioida kohteen toteutuksessa. Lisäksi kohteelle saatiin tehtyä rakenteiden lämmön ja suhteellisen kosteuden mittaus-suunnitelma.

Asiasanat: massiivitiili, lämpö, kosteus, wufi

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Construction engineering, House Building Engineering

Author(s): Joni Haapaniemi
Title of thesis: Building Physical Examination of Massive Brick Wall Structure
Supervisor(s): Kimmo Illikainen
Term and year when the thesis was submitted: S 2018
Pages: 70 + 5 appendices

The subject of this thesis was to examine the heat and moisture behavior of massive brick wall and its connections to other structures through numerical heat and moisture simulations. The buildings under examination were two block of flats, which are currently under designing. The exterior walls of these buildings will be manufactured out of bricks only, without separate heat insulation. The aim of this thesis was to produce heat and moisture calculations of this construction and to compose a plan for the measurement of the heat and relative humidity in the parts of construction.

The heat and moisture simulations of the constructions were executed by using WUFI 2D -program, which can be used to examine building physics in a more accurate way than with traditional methods. The calculations were executed in a non-stationary two-dimensional state and with variable properties of the building materials. The simulation models of the constructions were entered in the program and after calculation, the results of the heat and relative humidity in certain points for further examination was received. The calculations were mainly executed in a normal state of use of buildings, but furthermore, drying of the construction after manufacturing were examined. Mould growth was also examined in most critical places of the structure by using the Finnish mould growth model.

As a result of this thesis, information about the physical behavior of these constructions was gained. The results showed, that there are no issues in a functionality of these structures in a normal state of use. On the other hand, drying of the structures was slow according to the results and this should be taken in to account in execution of these buildings.

Keywords: massive brick, heat, moisture, wufi

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	7
2 RAKENTEIDEN LÄMPÖ JA KOSTEUS	8
2.1 Lämpö	8
2.1.1 Lämmön siirtymismuodot	8
2.1.2 Lämmön siirtyminen rakenteissa	9
2.2 Kosteus	10
2.2.1 Sade	10
2.2.2 Ilmankosteus	11
2.2.3 Aineen kosteus	12
2.2.4 Kosteuden liikkuminen rakenteissa	13
2.3 Rakenteiden simulointi WUFI 2D -ohjelmistolla	14
2.3.1 Geometria ja laskentaverkko	15
2.3.2 Materiaalit	16
2.3.3 Alkuolosuhteet	18
2.3.4 Pinnat ja ilmasto	19
2.3.5 Laskentaparametrit	20
2.4 Suomalainen homemalli	21
2.5 Rakenteiden kuivuminen	22
3 TARKASTELTAVA KOHDE JA RAKENTEET	25
3.1 Ulkoseinärakenne	26
3.1.1 Ulkoseinä käytävätilojen kohdalla	27
3.1.2 Ulkoseinä pesuhuoneen kohdalla	27
3.2 Välipohjaliittymä	28
3.3 Yläpohjaliittymä	29
3.4 Kantavan väliseinän ja ulkoseinän liittymä	30
3.5 Ikkunaliittymä	30
4 SIMULOINNIT JA TULOKSET	32
4.1 Käytettävät ilmastotiedot	32

4.2 Ulkoseinärakenne, pisteet A101-A103 ja A104-A106	35
4.3 Välipohjaliittymä, pisteet A202/A207 ja A203/A208	45
4.4 Yläpohjaliittymä, pisteet A301/303 ja A302/A304	48
4.5 Kantavan väliseinän ja ulkoseinän liittymä, pisteet A201/A206	51
4.6 Ikkunaliittymä, pisteet A204/A209 ja A205/A210	56
4.7 Kuivumistarkastelut	60
4.8 Homehtumistarkastelu suurilla rakennekosteuksilla	66
4.9 Simulointituloksien yhteenveto	67
5 LOPPUSANAT	68
LÄHTEET	69
LIITTEET	
Liite 1. Ulkoseinän rakennetyyppi	
Liite 2. Homeindeksi A104	
Liite 3. Lämpövirrat ikkunavertailussa	
Liite 4. Kuivumistarkastelun tulokset	
Liite 5. Homehtumistarkastelun tulokset	

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia Ouluun suunnitteilla olevan, kaksi 3-kerroksista asuinkerrostaloa sisältävän kiinteistön massiivitiilirakenteisia ulkoseiniä ja niiden liittymiä. Seiniin liittyviä rakenteita ovat yläpohja, välipohja, kantava väliseinä sekä ikkuna. Lisäksi tarkastellaan yhtenäistä ulkoseinärakennetta käytävätilojen ja pesuhuoneen kohdalla sekä rakenteiden kuivumista.

Kyseinen kiinteistö on koerakennuskohde, jonka rakennuttajana toimii Kiinteistö Oy Oulun Tarve. Kohteen pääsuunnittelijana toimii Arkkitehtitoimisto Veli Karjalainen Oy ja rakennesuunnittelusta vastaa WSP Finland Oy. Tämä opinnäytetyö on osa rakennesuunnittelua.

Tässä kohteessa rakennesuunnittelun apuna käytetään WUFI 2D -ohjelmistoa. Ohjelmistolla pystytään suorittamaan lämpö- ja kosteussimulointeja erilaisille rakenteille ja niiden liittymille. Simuloinnit voidaan tehdä muuttuvilla ilmastotiedoilla epästationäärisesti eli ajasta riippuvassa tilassa, jolloin lämpö- ja kosteustekniikan analysointi on tarkempaa kuin perinteisesti tehtynä. Myös rakennusmateriaalien ominaisuudet voidaan määrittää ohjelmaan lämmön ja kosteuden suhteen muuttuvina, joka osaltaan tarkentaa laskentaa.

Suunnitteilla olevaan kiinteistöön kuuluvat talot A ja B. Molemmat rakennukset ovat rakenteeltaan saman tyyppisiä ja niiden tarkastelu kuuluu suunnittelu-urakkaan. Tässä raportissa käydään läpi vain talon A tarkastelut. Talo B eroaa talosta A muun muassa ulkoseinässä käytettävien tiilien lämmönjohtavuuksien arvoissa.

Lopullisena tavoitteena on tuottaa rakennusten käyttötilanteen lämpö- ja kosteuslaskelmat rakenteista ja liittymistä muuttuvissa olosuhteissa sekä laatia mittaus-suunnitelma kyseiselle kohteelle. Laskennallisen tarkastelun lisäksi kohteen rakentamista seuraa useamman vuoden seurantajakso, jota varten rakenteisiin asennetaan lämpöä ja kosteutta mittaavia antureita. Antureista saadaan jatkuvaa dataa rakenteen todellisesta käyttäytymisestä olosuhteiden muuttuessa.

2 RAKENTEIDEN LÄMPÖ JA KOSTEUS

Rakenteissa lämpöä siirtyy kolmella eri tavalla, joita ovat johtuminen, säteily ja konvektio. Rakenteen lämpökäyttäytyminen vaikuttaa myös sen kosteuskäyttäytymiseen ja päinvastoin, jolloin näiden molempien tunteminen on tarpeen arvioi-
dessa sen toimivuutta. Yhdessä lämpö ja kosteus voivat aiheuttaa ongelmia huo-
nosti suunnitellussa kokonaisuudessa. (1, s. 40.)

2.1 Lämpö

Lämpö on molekyylien tai atomien värähtelyliikettä. Lämpö siirtyy paikasta toi-
seen kolmella eri tavalla. Lämmön siirtymismuotoja ovat johtuminen, säteily ja
konvektio. (1, s. 40.)

2.1.1 Lämmön siirtymismuodot

Johtumisessa eli konduktiossa tapahtuu lämmön virtaamista. Toisin sanoen läm-
pöenergia siirtyy molekyylistä toiseen. Lämmön virtaus-suunta on lämpimästä
kylmään päin ja virtaamista tapahtuu kiinteissä aineissa sekä nesteissä. (1, s.
40.)

Säteilyssä eli emissiossa energia siirtyy sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityk-
sellä valon nopeudella. Säteilyä lähettävät kaikki kappaleet, joiden lämpötila on
absoluuttisen nollapisteen yläpuolella. Eniten säteilyä lähettää niin sanottu musta
kappale. Pintojen emissiviteetti tarkoittaa pinnan säteilytehon suhdetta mustan
kappaleen säteilytehoon ja sen yksikkö on W/m^2 . Useimpien rakennusmateriaa-
lien emissiviteetti huoneenlämmössä asettuu välille 0,8 – 0,95. (1, s. 40; 2, s. 13.)

Rakennustekniikassa säteilylämpö on joko auringon lähettämää lyhytaaltoista
lämpösäteilyä tai kappaleiden lähettämää pitkäaaltoista lämpösäteilyä. Kun sä-
teily osuu rakenteen pintaan, osa säteilystä absorboituu rakenteeseen ja osa hei-
jastuu pois. Ikkunan tapauksessa osa säteilystä menee vielä lasin läpi. (1, s. 40;
2, s. 12.)

Konvektiolla tarkoitetaan lämmön siirtymistä kaasun tai nesteen virtauksen mukana. Konvektio eli virtaus on joko pakotettua tai puhtaasti luonnollista, joista jälkimmäistä esiintyy rakenteissa harvoin. Rakenteiden konvektioon vaikuttavat yleensä molemmat. Esimerkiksi ulkoseinän lämmöneristekerroksessa tapahtuvaan konvektioon vaikuttaa niin eristeen reunoilla vaikuttava lämpötilaero luonnollisesti kuin rakenteen ulkopuolella puhaltava tuuli. Konvektion mukana voi siirtyä merkittäviä määriä lämpöä. (1, s. 41; 2, s. 13.)

2.1.2 Lämmön siirtyminen rakenteissa

Lämpövirtojen arvioinnissa rakenteiden läpi käytetään U-arvoa. U-arvo eli lämmönläpäisykerroin ilmoittaa sen lämpövirran tiheyden, joka kulkee yhden neliömetrin kokoisen rakenteen osan läpi, kun lämpötilaero rakenteen eri puolisten ympäristöjen välillä on yksikön suuruinen. Lämmönläpäisykerroimen yksikkö on $W/(m^2K)$. Todellisuudessa rakenteiden U-arvo ei pysy vakiona vaan muuttuu esimerkiksi rakenteiden kostuessa. Koko rakenteen U-arvo riippuu sen sisältämien ainekerrosten lämmönjohtavuuksista ja kylmäsilloista. (2, s. 14.)

Kun lämpövirta pyrkii rakenteen läpi sisältä ulos, U-arvossa ovat mukana myös sisä- ja ulkopintojen pintavastukset. Pinnan lämmönvastus ilmoittaa rakenteen pinnan ja sen ulko- tai sisäpuolisen ympäristön välisen rajan lämmönvastuksen, jotka riippuvat lämpövirran suunnasta (taulukko 1).

TAULUKKO 1. Pintavastukset (2, s. 15)

Pintavastus m^2K/W	Lämpövirran suunta		
	Ylöspäin	Vaakaan	Alaspäin
Sisäpinta R_{si}	0,10	0,13	0,17
Ulkopinta R_{se}	0,04	0,04	0,04

Myös tuulettumattomalla ilmakerroksella on lämmönvastus, joka riippuu ilmarakon paksuudesta sekä ilmarakoa rajoittavien pintojen emissiviteetistä. Tuulettumaton ilmakerros on rakenteessa oleva väli, jossa ilmavirtausta ei pääse tapahtumaan

aukon reunalta toiselle. Lisäksi esimerkiksi seinän tuulettumattomaan ilmakerrokseen voi johtaa pieniä aukkoja, mutta niiden yhteenlaskettu pinta-ala ei saa ylittää 500 neliömillimetriä pystysuoran ilmakerroksen pituusyksikköä (m) kohti. (1, s. 47.)

2.2 Kosteus

Kosteutta esiintyy vesihöyrynä, nestemäisenä sekä kiinteänä eli jäätyneenä. Rakenteissa sitä voi ilmentyä kaikissa muodoissaan ja se voi aiheuttaa vaurioita huonosti suunnitelluissa rakenteissa. Jos jokin rakenneosaa pysyy pitkään kosteana ja lämpötila suotuisana, alkaa rakenteeseen muodostumaan mikrobeja. Lisäksi rakenneosaa voi jäätyä talvella ja aiheuttaa näin merkittäviä vaurioita. Maan yläpuolisissa rakenteissa pääasialliset kosteuslähteet ovat sade, ilmankosteus ja aineen kosteus. (1, s. 65.)

2.2.1 Sade

Sade on rakentamisessa esiintyvistä kosteusmuodoista näkyvin ja se voidaan jakaa ajallisesti kahteen osaan, rakentamisen aikaiseen ja rakentamisen jälkeiseen vaiheeseen. Rakentamisen aikainen sade voi aiheuttaa merkittäviä vaurioita, koska rakenteet ovat keskeneräisiä ja sekä rakenteiden että materiaalien suojaamiseen työmaaolosuhteissa liittyy monia riskejä. Toisaalta pitkällä aikavälillä katsottuna rakentamisaika on lyhyt verrattuna rakennusten suunniteltuun käyttöikään, jolloin rakentamisen jälkeinen sade vaikuttaa rakenteisiin. (1, s. 66; 2, s. 40.)

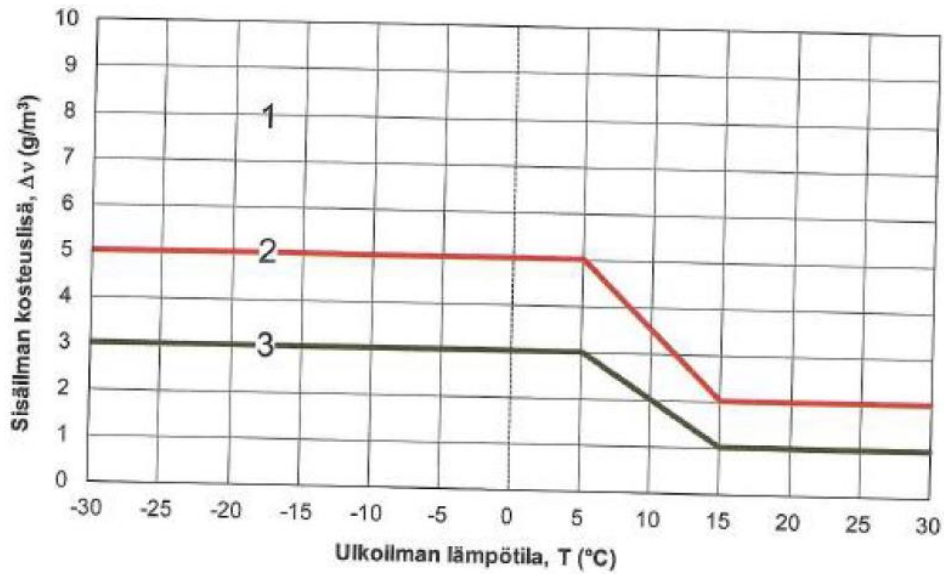
Sadetta voi esiintyä vuodenajasta riippuen vetenä, lumena tai räntänä, joista rakenteita rasittavin on räntä, etenkin sen jäädessä vaikuttamaan pitkäksi aikaa loiville pinnoille. Pystysuoraan tulevasta sateesta koituu eniten räsitystä vaakasuorille pinnoille, mutta tuulen vaikuttaessa sateen aikana aiheutuu myös pystypinnoille räsitystä viistosateesta. Viistosateen vaikutus rakenteeseen riippuu muun muassa rakennusmateriaalista, ilmansuunnasta, paikkakunnasta sekä rakennuksen muodosta ja lähiympäristöstä. (1, s. 66; 2, s. 40.)

2.2.2 Ilmankosteus

Ilmankosteus liittyy kaikkiin vedenpinnan yläpuolisiin rakenteisiin. Näihin vaikuttavia kosteuslähteitä ovat ulkoilman kosteus, sisäilman kosteus ja rakennusmateriaalien yleensä sisältämien huokosten ilmankosteus. Rakennustekniikassa kosteutta kuvataan yleensä suhteellisella kosteudella (RH), joka kertoo tietyn lämpöisen ilman sisältämän kosteusmäärän prosentteina siitä määrästä, joka kyseisen lämpöiseen ilmaan mahtuu. Korkea suhteellinen kosteus ja sopiva lämpötila voivat mahdollistaa esimerkiksi homeen kasvun rakennusaineiden pinnoissa. Homeelle suotuisat olosuhteet muodostuvat, kun lämpötila on noin +3 - +45 celsiusastetta ja suhteellinen kosteus > 75 prosenttia. (1, s. 68; 2, s. 60.)

Ulkoilman suhteellinen kosteus Suomessa vaihtelee kesän ja talven välillä noin 50 prosentista 90 prosenttiin. Kesällä lämpimistä ilmoista johtuen suhteellinen kosteus on alhainen, kun taas talvisin kylmään ilmaan mahtuu vähemmän kosteutta, jolloin suhteellinen kosteus on korkea. Absoluuttista kosteutta eli ilman sisältämää vesihöyryn määrää grammoina ilman kuutiometriä kohden määrittäessä tulee kuitenkin huomioida, että suhteellisen kosteuden ollessa sama eri lämpöisissä ilmoissa, sisältää lämmin ilma enemmän kosteutta kuin kylmä. (1, s. 69.)

Sisäilman kosteus riippuu ulkoilmasta, sisällä tuotetusta kosteudesta ja rakennuksen ilmanvaihdesta. Sisällä tapahtuvista toiminnoista aiheutuu yleensä aina lisäkosteutta, joka pyrkii tasoittumaan rakenteen läpi ulkoilmaan. Laskelmissa sisäilmaan oletetaan kosteuslisä, jolle on olemassa kansainvälisen standardin mukainen luokitus. Suomessa tehtyjen tutkimusten mukaan sisäilman kosteuslisälle on kuitenkin syytä käyttää standardista poikkeavia arvoja kuvan 1 mukaan. (3, s. 23.)



KUVA 1. Sisäilman kosteuslisät ulkolämpötilan funktiona kosteusluokittain (3, s. 24)

Kuten kuvasta 1 nähdään, on sisäilman kosteuslisä suurempi talvella kuin kesällä. Tämä johtuu siitä oletuksesta, että kesäisin rakennuksen käyttäjät ovat enemmän poissa rakennuksesta ja tiloja tuuletetaan enemmän kuin talvella. Kuvan mukaiset luokitukset 1, 2 ja 3 vastaavat karkeaa jaottelua siten, että luokkaan 2 kuuluvat tavanomaiset asuinrakennukset, luokkaan 3 puolilämpimät ja kylmät rakennukset ja luokkaan 1 suuresti kosteusrasitettut rakennukset, kuten esimerkiksi kylpylät. Kosteusluokan 1 kohteissa on kosteuslisä aina arvioitava tapauskohtaisesti. (3, s. 25.)

2.2.3 Aineen kosteus

Vettä voi sitoutua materiaaleihin kemiallisesti ja fysikaalisesti. Fysikaalisesti sitoutunutta vettä materiaali sisältää sen hygroskooppisuuden mukaan. Kosteusteknisissä laskelmissa huomioidaan vain jälkimmäinen, koska kemiallisesti sitoutunut kosteus ei liiku materiaalissa. Hygroskooppinen aine vastaanottaa sekä luovuttaa kosteutta ympäristönsä välillä suhteellisesta kosteudesta riippuen. Materiaalit saavuttavat tasapainokosteuden ympäristönsä kanssa niiden hygroskooppisuuden mukaan. (1, s. 77; 2, s. 52.)

Tasapainokosteuteen vaikuttaa myös se, onko materiaali kastumassa vai kuivumassa. Kosteuden siirtymistä aineeseen kutsutaan absorptioksi ja eri materiaalit absorptioivat kosteutta eri tavoin. Kosteuden poistumista rakenteesta taas kutsutaan desorptioksi. Eri materiaalien tasapainokosteuksia kuvataan materiaalikohteisilla sorptiokäyrillä. (1, s. 77.)

Merkittävä osuus usean rakennusaineen kosteudesta rakennusaikana ja sen jälkeen johtuu rakennekosteudesta, jolla tarkoitetaan rakenteesta poistuvaa kosteus määrää materiaalin tasapainokosteuteen saakka. Paljon rakennekosteutta sisältäviä rakenteita ovat esimerkiksi betonivalut ja tiilimuuraukset niissä käytetävän suuren vesimäärän vuoksi. Vaikka esimerkiksi tiili itsessään on valmistuksen jälkeen melkein kuiva materiaali, joutuu siihen merkittävä määrä vettä muurauksen yhteydessä laastista. Rakennekosteuden arviointi yleisesti on vaikeaa, koska se vaihtelee suuresti riippuen muun muassa rakenteesta, varastoinnista, kuljetuksesta ja materiaalien sekä rakenteiden suojaamisesta eri vaiheissa. (2, s. 51.)

2.2.4 Kosteuden liikkuminen rakenteissa

Edellä selitetyt kosteuden muodot liikkuvat rakenteissa pääasiassa kolmella tavalla. Liikkuminen tapahtuu diffuusiona, konvektion eli ilmvirran mukana ja/tai kapillaarisesti. Vesihöyry liikkuu rakenteissa diffuusion ja konvektion avulla, kun taas kiinteä vesi kapillaarisesti. Kapillaarinen veden liikkuminen eri rakenteiden välillä katkaistaan yleensä tarkoituksen mukaisella kerroksella. Materiaalin suhteellisen kosteuden ollessa suuri, osa kosteudesta liikkuu myös nestemäisenä. (2, s. 52.)

Diffuusio eli kosteuden pyrkiminen tasapainoon tilojen välillä niiden vesihöyryn osapaineiden mukaan aiheuttaa rakennustekniikassa kosteusvirran rakenteen läpi. Rakenteissa vesihöyry pyrkii siirtymään yleensä lämpimästä kylmään, jossa ilman vesihöyryn osapaine on pienempi. Sen vuoksi liiallisen kosteuden joutumista rakenteisiin joudutaan yleensä rajoittamaan käyttämällä lämpimällä puolella riittävän vesihöyrytiivistä kerrosta, mikäli kosteudesta aiheutuu haittaa rakenteen sisällä. (1, s. 70.)

Diffuusion lisäksi vesihöyryä voi liikkua myös merkittäviä määriä konvektion mukana. Suurista kokonaispaine-eroista talvella johtuvasta rakojen ja reikien kautta siirtyvästä kosteudesta voi aiheutua merkittäviä vaurioita rakenteeseen. Kosteusmäärät voivat olla moninkertaisia verrattuna diffuusiolla siirtyviin määriin. (1, s. 72.)

Kosteuden liikkumisesta rakenteessa edellä mainituilla tavoilla voi aiheutua kosteuden kondensoitumista eli vesihöyryn tiivistymistä vedeksi. Tiivistymistä voi tapahtua rakenneosan sisällä tai osien rajapinnoissa, kun ilman suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä on 100 prosenttia. Materiaalien erilaiset vesihöyrynvastukset vaikuttavat diffuusiolla siirtyviin kosteusmääriin. Vesihöyrynvastus kuvaa materiaalin kykyä vastustaa vesihöyryn virtausta ja on myös riippuvainen ilman suhteellisesta kosteudesta. (1, s. 73.)

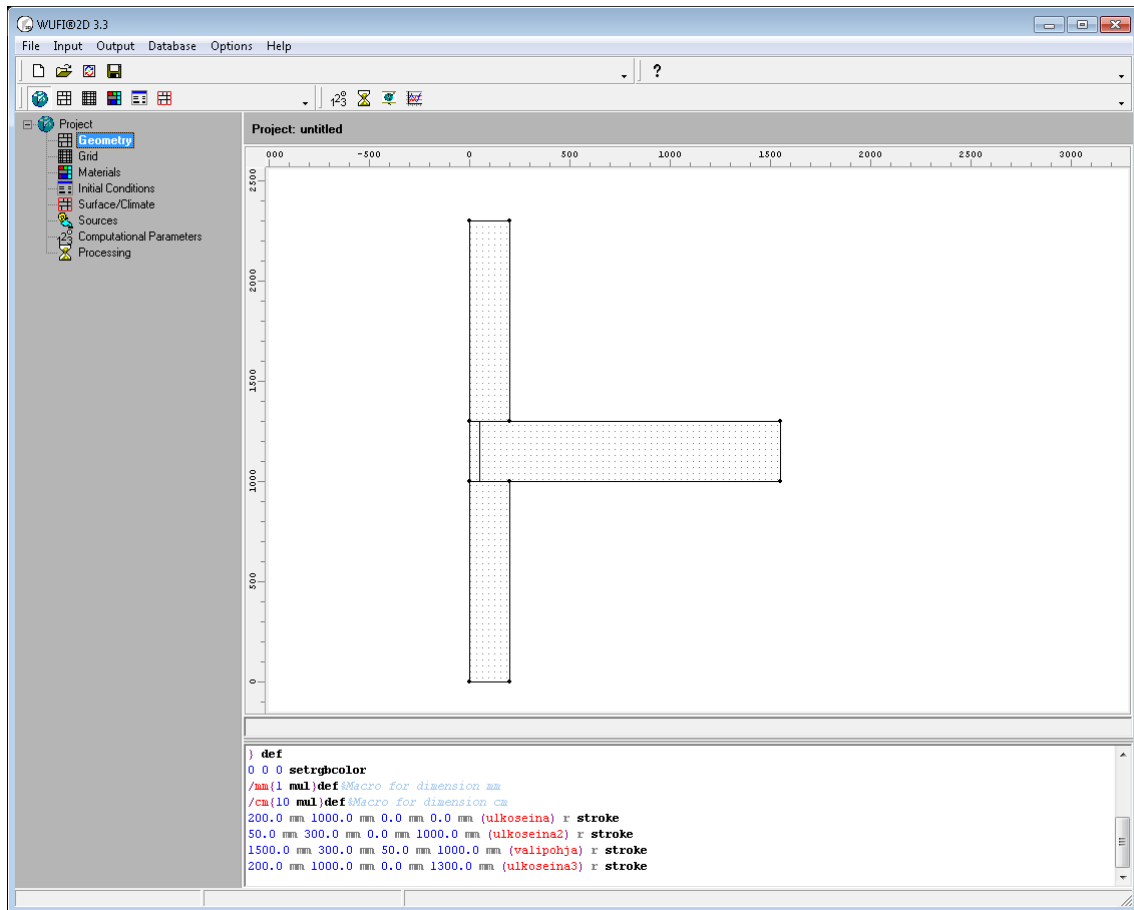
2.3 Rakenteiden simulointi WUFI 2D -ohjelmistolla

Kohteen lämpö- ja kosteussimuloinnit suoritetaan saksalaisen Fraunhofer institut für bauphysik'in tuottaman WUFI 2D -ohjelmiston avulla. Ohjelmalla pystytään tarkastelemaan rakenteita epästationäärisesti eli ajasta riippuvassa tilassa muuttuvissa sääolosuhteissa. Ohjelma pystyy huomioimaan lähtötiedoista riippuen lämmönsiirron osalta lämmön johtumisen, kosteuden faasimuutosten aiheuttaman lämmön sitoutumisen ja siirtymisen, auringon säteilyn sekä yöaikaisen säteilyjäähdytymisen. Kosteuden osalta ohjelma pystyy huomioimaan vesihöyryn ja liuoksen diffuusion sekä veden kapillaarisen siirtymisen. Sekä lämmön- että kosteudensiirtymisen osalta ohjelma jättää huomioimatta ilmavirtausten mukana siirtyvät komponentit niiden ollessa vaikeita määrittää. (4, s. 6.)

Jotta ajasta riippuva laskenta on mahdollista, tulee ohjelmaan syöttää reunaehdot. Syötettäviä ehtoja ovat rakenteen pintoja rajaavien ympäristöjen lämpötila ja suhteellinen kosteus, vesisade sekä auringon säteily. Koska kaikkien edellä mainittujen täytyy myös muuttua jokaisella ajanhetkellä, täytyy laskentaa varten olla saatavissa mitattua säädataa. Data voidaan määrittää käyttämällä ohjelman sisältämiä meteorologisia tietoja. Vaihtoehtoisesti säädata voidaan myös määrittää itse ohjelmiston mukana tulevan määrittäytiedoston avulla, esimerkiksi Suomessa Ilmatieteen laitoksen mittaamista tiedoista. (4, s. 6.)

2.3.1 Geometria ja laskentaverkko

Laskenta aloitetaan projektitietojen syötön jälkeen määrittämällä simuloitavan rakenteen geometria (kuva 2).

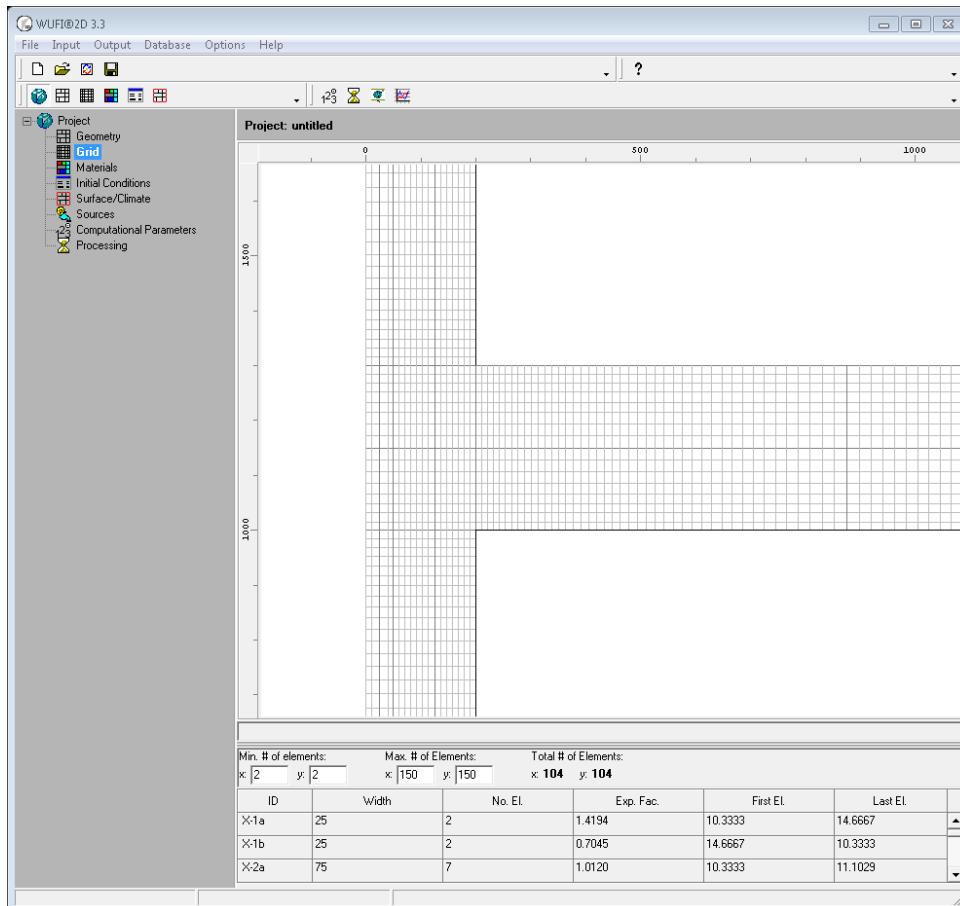


KUVA 2. Geometrian määrittäminen

Rakenteen geometria täytyy syöttää käyttäen suorakulmion muotoisia elementtejä. Ensimmäisen elementin paikan määrittäminen voidaan valita vapaasti, minkä jälkeen jokaisen tulevan elementin täytyy liittyä johonkin toiseen elementtiin vähintään yhdestä kulmasta. Helpointa on määrittää ensimmäinen elementti piirtämällä se kulmastaan koordinaatiston 0-pisteeseen, minkä jälkeen seuraavien elementtien tarkempi määrittely tekstieditorilla on helpompaa. (5)

Kun rakenteen geometria on määritetty, täytyy kokoonpanolle määrittää laskentaverkko. Laskentaverkon määrittäminen on pakollista rakenteen numeerisen ratkaisun vuoksi. Siirryttäessä laskentaverkko-välilehdelle (kuva 3) ohjelma määrittää automaattisen laskentaverkon kokoonpanolle. Verkko on useimmissa tapauksissa

riittävä ja sitä voidaan tihentää kolmen asteen verran karkeasta hienoon. Mikäli rakenne on monimutkainen ja käyttäjä haluaa esimerkiksi tarkastella tiettyjä pisteitä tarkemmin, voi laskentaverkon myös määrittää samalla välilehdellä manuaalisesti. Rakenteen monimutkaisuus ja laskentaverkon tiheys vaikuttavat merkittävästi laskenta-aikaan. (6)



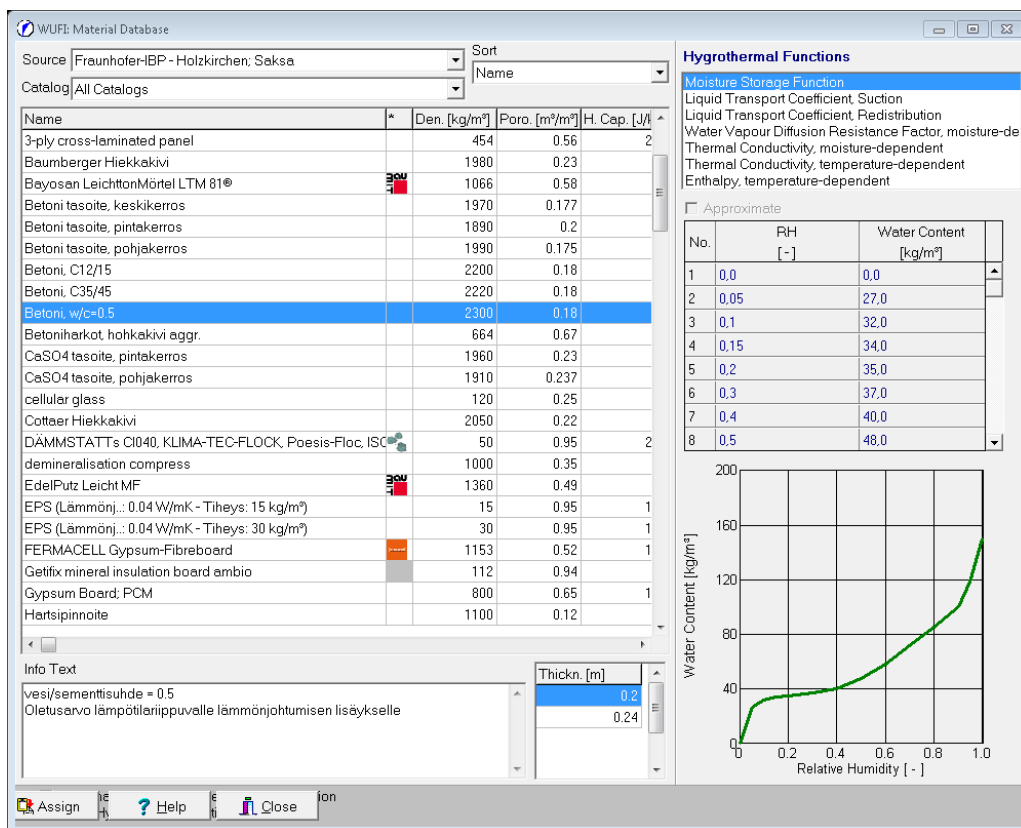
KUVA 3. Laskentaverkon määrittäminen

2.3.2 Materiaalit

Materiaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet muuttuvat ympäristön lämpötilan ja kosteuden mukaan. Yleensä materiaaliominaisuudet määritellään vain yhdessä olosuhteessa, jolloin kehittyneemmällä laskentaohjelmalla laskettaessa ei laskennasta saada kaikkea hyötyä irti. Varsinkin kylmemmissä rakenteen ulko-osissa tällä on merkitystä pakkasten ja sateiden vuoksi. (7, s. 14.)

Ohjelmassa materiaaliominaisuudet voidaan antaa kattavasti. Laskentaan tarvittavia perustiedot ovat tiheys, huokoisuus, ominaislämpökapasiteetti, kuivan materiaalin lämmönjohtavuus sekä kuivan materiaalin vesihöyryn diffuusiovastuskerroin. Mikäli laskentaa halutaan tarkentaa, voi materiaaleille määrittää myös tasapainokosteuskäyrän, nestemäisen veden siirtymiskertoimen kastumisen ja uudelleenjakautumisen osalta sekä lämmönjohtavuuden ja diffuusiovastuksen suhteellisen kosteuden funktiona. Tämän lisäksi samalle elementille voidaan määrittää erilaiset ominaisuudet x- ja y-suunnassa. (4, s. 8.)

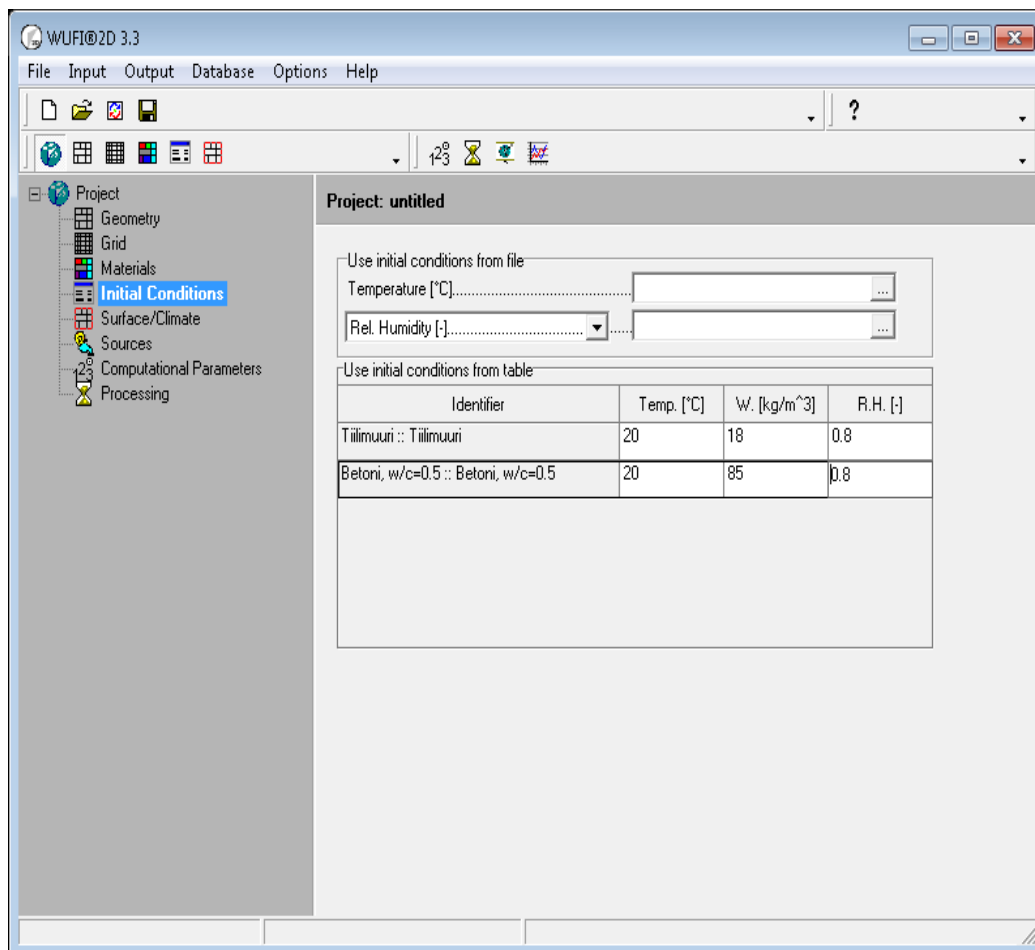
Ohjelmistoon kuuluvassa materiaalitietokannassa (kuva 4) on paljon valmiita materiaaleja, joilla on yleensä kattavasti määritetyt ominaisuudet. Ylhäällä olevasta valikosta voidaan valita eri instituuttien määrittelemiä materiaaleja. Mikäli tarvittavaa materiaalia ei löydy tietokannasta, voi sen määrittää itse tekemällä kokonaan uuden materiaalin materiaalieditorilla tai muokkaamalla jotain olemassa olevaa materiaalia. (8)



KUVA 4. WUFI 2D -ohjelmiston sisältämä materiaalitietokanta

2.3.3 Alkuolosuhteet

Seuraavaksi ohjelmapuussa määritetään materiaalien alkukosteudet ja lämpötilat (kuva 5). Oletuksena ohjelma antaa kaikille materiaaleille lämpötilan 20 celsiusastetta ja suhteellisen kosteuden 80 prosenttia. Alkuolosuhteita voidaan muuttaa antamalla valintaruudussa koko rakennekerrokselle tietyt arvot tai määrittämällä ne tiedostosta. Materiaalin suhteellinen kosteus johtaa tiettyyn vesipitoisuuteen materiaalin tasapainokosteuskäyrän mukaan. (9)



KUVA 5. Alkuolosuhteiden määrittäminen

2.3.4 Pinnat ja ilmasto

Seuraavaksi laskentaa varten täytyy määrittää rakennetta rajaavien pintojen ominaisuudet ja olosuhteet. Pinnoille määritetään lämmönsiirtokertoimet, säteilyominaisuudet, sadeveden absorptiokerroin ja tarvittaessa sd-arvo (kuva 6). Rakenteen leikkausrajat voidaan määrittää adiabaattisiksi, jolloin niiden läpi ei siirry lämpöä eikä kosteutta. Joitain arvoja löytyy jälleen jo valmiina ohjelmasta, mutta kaikki voidaan määrittää myös itse. (10)

Surface/Climate - 0@ulkoseina,0@ulkoseina2=1@ulkoseina

Surface Coefficients Climate

Adiabatic/System Border..... ☐

Treat as Indoor Surface..... ☐

Sd Value [m]..... 2 Tiilet

Heat Transfer Coefficient [W/m²K] 0

Wind Dependent ☐

Short-Wave Radiation Absorptivity [-] 0.36 Tiili, savi, kerma, lasitettu

Long-Wave Radiation Emissivity [-] 0.9 Details ...

Rain Reduction Factor [-] 0

Surface Type Wall

Surface Group

Color in Model

OK Cancel Help

KUVA 6. Pinnan ominaisuuksien määrittäminen

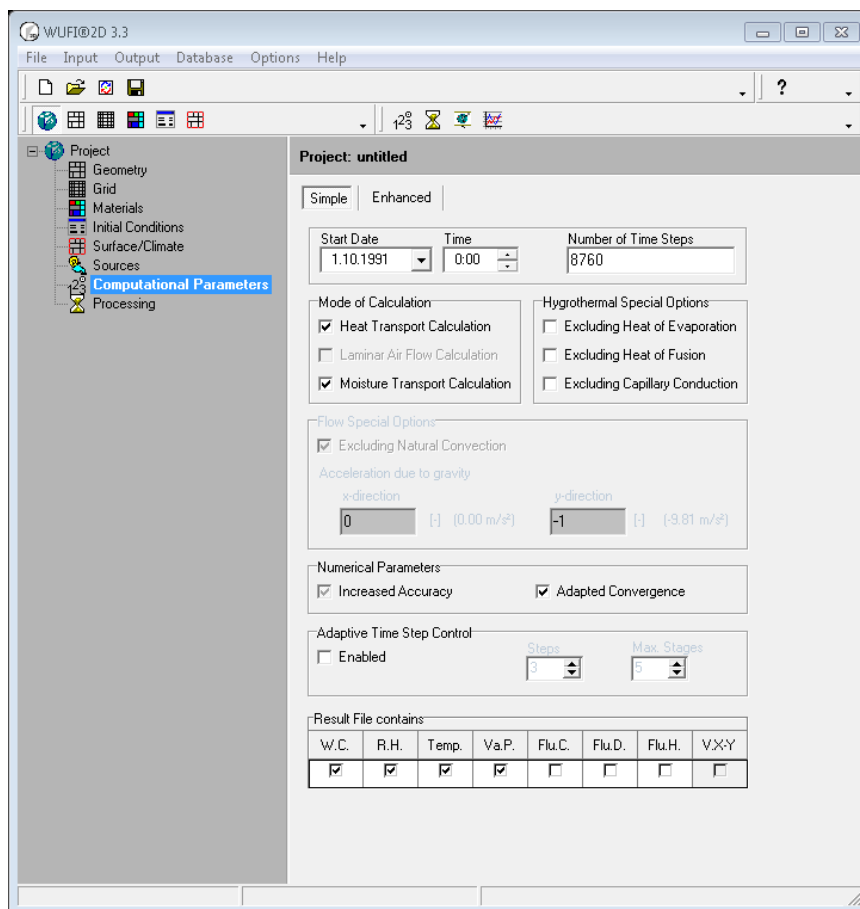
Seuraavaksi pinta tulee sijoittaa ympäristöön. Tämä tapahtuu määrittämällä pintaan vaikuttava ilmastotiedosto sekä pinnan asento ja ilmansuunta. Lisäksi mikäli ilmastotiedosto sisältää tiedot pystysuorasta sateesta, tulee pinnalle määrittää

sadekerttoimet R1 ja R2, joista ensimmäinen kuvaa pystysuorasta sateesta pintaan pääsevän kosteuden ja toinen viistosateen osuuden. Ilmastotiedoston voi valita ohjelman sisältämästä tietokannasta tai määrittää itse mukana tulevilla Excel-tiedostolla. Sisäpinnan olosuhteet voidaan esimerkiksi johtaa ulkoilmasta käyttäen sisäilman kosteuslisää tai antamalla sisätilaan vakio-olosuhteet. (11)

Kokoonpanon sisällä voidaan elementeille antaa myös lämmön-, kosteuden- tai ilmanvaihdonlähde. Esimerkiksi ilmanvaihtolähteelle annetaan ilmanvaihtuvuus yksikössä 1/h ja määritetään ilmasto, josta ilma vaihdetaan. (12)

2.3.5 Laskentaparametrit

Viimeisenä ennen laskentaa määritetään laskennan ehdot (kuva 7). Välilehdeltä valittavia perusasioita ovat laskennan aloitusajankohta, laskennan kesto, lämmön ja kosteuden huomiointi laskennassa sekä tulostiedoston sisältämät tiedot. Toisella välilehdellä voidaan tehdä erilaisia tarkennuksia laskentaan. (13)



KUVA 7. Laskentaparametreja

2.4 Suomalainen homemalli

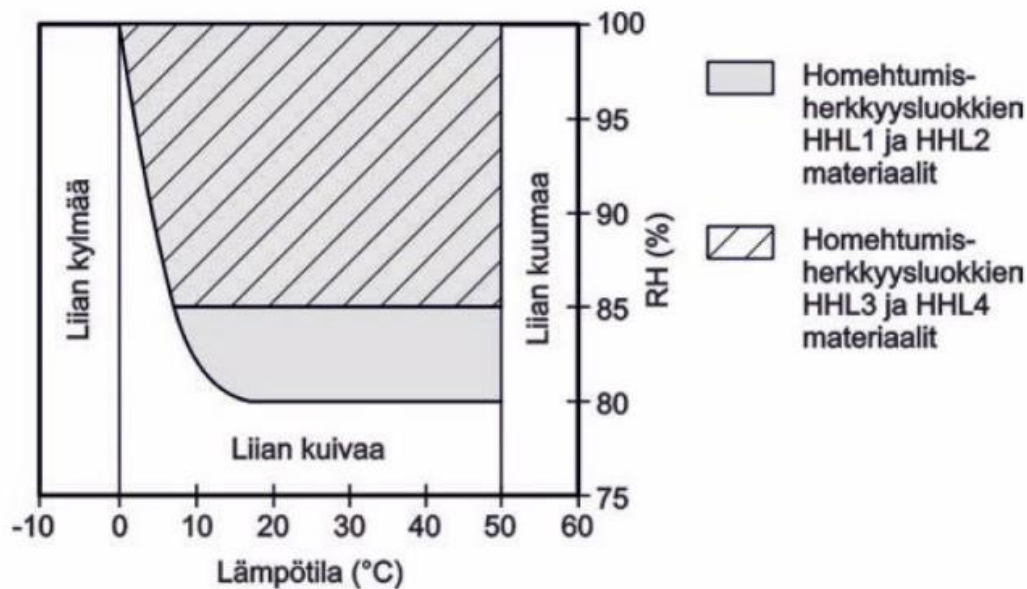
Suomessa Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy ja Tampereen teknillinen yliopisto TTY ovat kehittäneet yhteistyössä homeen kasvun arviointiin soveltuvan homemallin. Malli on kehitetty aiemmin puumateriaaleille kehitetyn mallin pohjalta ja sillä voidaan arvioida homeen kasvua eri materiaalien pinnoilla muuttuvissa lämpö- ja kosteusolosuhteissa ajan funktiona. Malli on tällä hetkellä pisimmälle kehitetty työkalu homehtumisriskin arviointiin. (14)

Homemallista saatava vertailusuure on homeindeksi M, joka voi vaihdella välillä 0 - 6 (kuva 8). Homeindeksin laskemista varten tarvitaan joko mitattua tai laskettua dataa rakenteen lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta tunnin välein. Annettujen tietojen perusteella työkalu laskee homeindeksin arvon, joka sisältää myös homeen kasvun taantumisen liian kuivissa tai kylmissä olosuhteissa. Kokeellisesti todennetun tiedon mukaan tunnin mittainen aika-askel laskennassa vastaa parhaiten todellista tilannetta. Homeindeksi ei kuitenkaan ota kantaa esiintyvän homeen lajiin vaan ylipäätään homeen kasvuun, jolloin sen avulla ei voida arvioida mahdollisesti esiintyvän homeen terveysvaikutuksia. (14)

Home-indeksi M	Havaittu homeenkasvu	Huomautuksia
0	Ei kasvua	Pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu	Paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Homerihmasto peittää 10 % tutkittavasta alasta (mikroskoopilla). Useita rihmastopesäkkeitä muodostunut.
3	Silmin havaittava kasvu Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Alle 10 % peitto alasta (silmillä) Alle 50 % peitto alasta (mikroskoopilla) Uusia itiöitä alkaa muodostua
4	Selvä silmin havaittava kasvu Runsas mikroskoopilla havaittava kasvu	Yli 10 % peitto alasta (silmällä) Yli 50 % peitto alasta (mikroskoopilla)
5	Runsas silmin havaittava kasvu	Yli 50 % peitto alasta (silmillä)
6	Erittäin runsas kasvu	Lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto

KUVA 8. Homeindeksiluokat ja kuvaukset (14)

Homeen kasvulle suotuisat olosuhteet vaihtelevat hieman materiaalista riippuen (kuva 9). Tämän vaikutusta voidaan arvioida, kun tiedetään käytettävän materiaalin homehtumisherkkyysluokka. Mallia varten on eri materiaaleille tehty homehtumisherkkyysluokittelu hyvin herkstä kestävään, jossa esimerkiksi mineraalivilat ja tiilet kuuluvat luokkaan HHL3, kohtalaisen herkkä. (14)



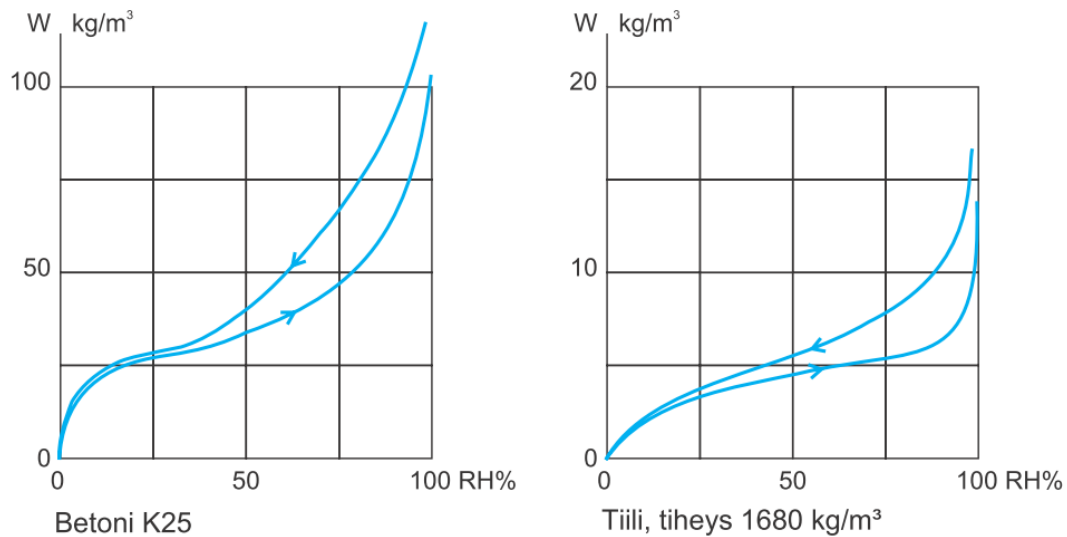
KUVA 9. Homeelle suotuisat olosuhteet homehtumisherkkyysluokittain (14)

2.5 Rakenteiden kuivuminen

Opinnäytetyössä tutkittavaan kohteeseen tulevien massiivitiili- ja paikallavalurakenteiden vuoksi on rakenteiden kuivumiseen syytä kiinnittää huomiota. Näihin rakenteisiin tuotantovaiheessa tulevien vesimäärien tulisi pystyä poistumaan rakenteista aiheuttamatta ongelmia. Jotta tähän päästään, tulee tiloja todennäköisesti tuulettaa ja lämmittää ennen pinnoitusta sekä varmentaa rakenteiden riittävän kuivat olosuhteet kosteusmittauksin. Simuloinneista saadaan ainakin karkeasti arvioitua rakenteiden kuivumista, joka tosin riippuu hankalasti etukäteen arvioitavista tiedoista.

Rakennusmateriaalien tasapainokosteuskäyrien kautta voidaan arvioida rakenteissa olevia kosteusmääriä eri ympäristöissä. Materiaalien tasapainokosteudet

voivat kuitenkin vaihdella huomattavasti eri tuoteryhmien välillä ja tämän vuoksi kirjallisuudessa esitettyjä tasapainokosteuskäyriä voidaan pitää vain suuntaa-antavina. Kuvassa 10 on esitetty esimerkiksi lujuusluokan K25 betonin sekä tiilen tasapainokosteuskäyrät. (15)



KUVA 10. Betonin K25 ja tiilen (tiheys 1680 kg/m³) tasapainokosteuskäyrät (15)

Rakentamisen jälkeen on esimerkiksi tiilimuurauksen kosteudeksi arvioitu 80 kg/m³ ja tasapainokosteudeksi 10 kg/m³, kun ympäristön suhteellinen kosteus on 50 prosenttia. Kuvan 11 taulukossa on arvioituna myös joidenkin muiden materiaalien rakennekosteuksia. (15)

Taulukko 1.

Rakennusaineiden rakennuskosteuksia. Arvot ovat suuntaa-antavia.

Rakennusaine	Kosteus kg/m ³			
	Valmistus- kosteus	Kemiallisesti sitoutunut kosteus	Tasapainokos- teus, kun ilman RH = 50%	Poistuva rakennuskosteus, kun ilman RH = 50 %
Betoni				
K15	180	40	25	115
K25	180	60	30	90
K40	180	70	40	70
Kevytbetoni	100...200	-	20	80...180
Kalkkisementtilaasti	300	20	30	250
Tiili	10	-	10	0
Tiilimuuri	80	-	10	70
Puu	60	-	40	20

Betonisen rakennusosan tulee olla riittävästi kuivunut, kun se pintakäsitellään tai siihen asennetaan pintakerros. Vaatimuksia sen sallitusta suhteellisesta kosteudesta esitetään julkaisuissa

- SisäRYL 2000 Rakennustöiden yleiset laatuvaatimukset. Talonrakennuksen sisätyöt (RT 14-10668)
- by 35/BLY 6 Betonilattioiden pinnoitusohjeet. Polymeeripinnoitteet, pölynsidonta- ja imeytys-käsittelyt
- by 40 Betonipinnat
- by 45 Betonilattiat.

Betonin kosteuden mittaamisesta esitetään ohjeet RT-ohjekortissa RT 14-10675 Betonin suhteellisen kosteuden mittaaminen. Ohjeita betonirakennustöihin on Suomen Betonitieto Oy:n julkaisussa Kestävä kivitalo paikallarakentaen. Betonin kosteuden hallinta.

KUVA 11. Rakennusaineiden rakennuskosteuksia RT 05-10710 (15)

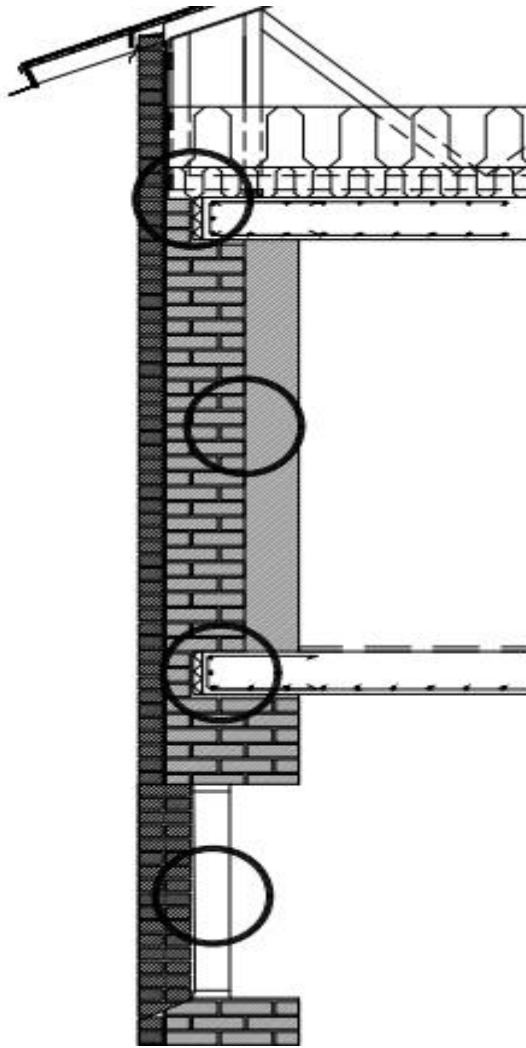
Tiilimuurauksen selvästi suurempi vesipitoisuus pelkkään tiileen verrattuna selittyy rakenteeseen käytettävästä laastista. Jos esimerkiksi arvioidaan kuutiometriin muurausta menevän noin 25 prosenttia laastia, tarkoittaa se rakenteessa noin 250 litraa laastia kuutiometriä kohden. Mikäli yhdestä 25 kilogramman muurauslaastisäkistä saadaan noin 14 litraa valmista massaa, jonka valmistamiseen tarvitaan noin 3,5 litraa vettä, tarkoittaa se laastista seinään meneväksi vedenmääräksi noin 63 kg/m³. Tämän kosteuden lisäksi tiileen voi päätyä kosteutta myös muista lähteistä.

Laskennallista arviointia vaikeuttaa alkukosteuksien arvioinnin lisäksi materiaalien olo kapillaarisella alueella tuotantovaiheen jälkeen. Sekä materiaaliominaisuuksien määrittäminen sekä materiaalien käyttäytyminen tällä alueella on haastavaa. Myös laskentaohjelmat aiheuttavat rajoituksia arviointiin. Tämä johtuu siitä, että laskentaohjelmissa kapillaarista kosteuden siirtymistä tapahtuu, vaikka lämpötila rakenteessa laskee alle 0 celsiusasteen. (16)

3 TARKASTELTAVA KOHDE JA RAKENTEET

Opinnäytetyön kohteena oli Oulun Kaakkurin kaupunginosaan suunnitteilla oleva kiinteistösaakeyhtiö. Kiinteistöön kuuluu kaksi kolmikerroksista asuinkerrostaloa, erilliset pihavarastorakennukset, väestönsuojatila sekä piha-alueet ja autokatokset. Tutkimuksen kohteena ovat asuinkerrostalot A ja B niihin tulevien massiivitiilirakenteisten ulkoseinien vuoksi.

Tutkittavana rakenteena on massiivitiilirakenteinen ulkoseinä ja sen liittymäkohdat muihin rakenteisiin. Monitorointipisteitä ovat ulkoseinä käytävätilojen ja pesuhuoneen kohdalla, välipohjaliittymä, yläpohjaliittymä, kantavan teräsbetoniväliseinän ja ulkoseinän välinen liittymä sekä ikkunaliittymä. Tarkasteltavia alueita on havainnollistettu kuvassa 12. Rakenteita tarkastellaan kahteen ilmansuuntaan, koilliseen ja lounaaseen, johtuen rakennusten sijoittelusta tontilla. Tarkastelupisteiden sijainnit on esitetty tarkemmin luvussa 4.



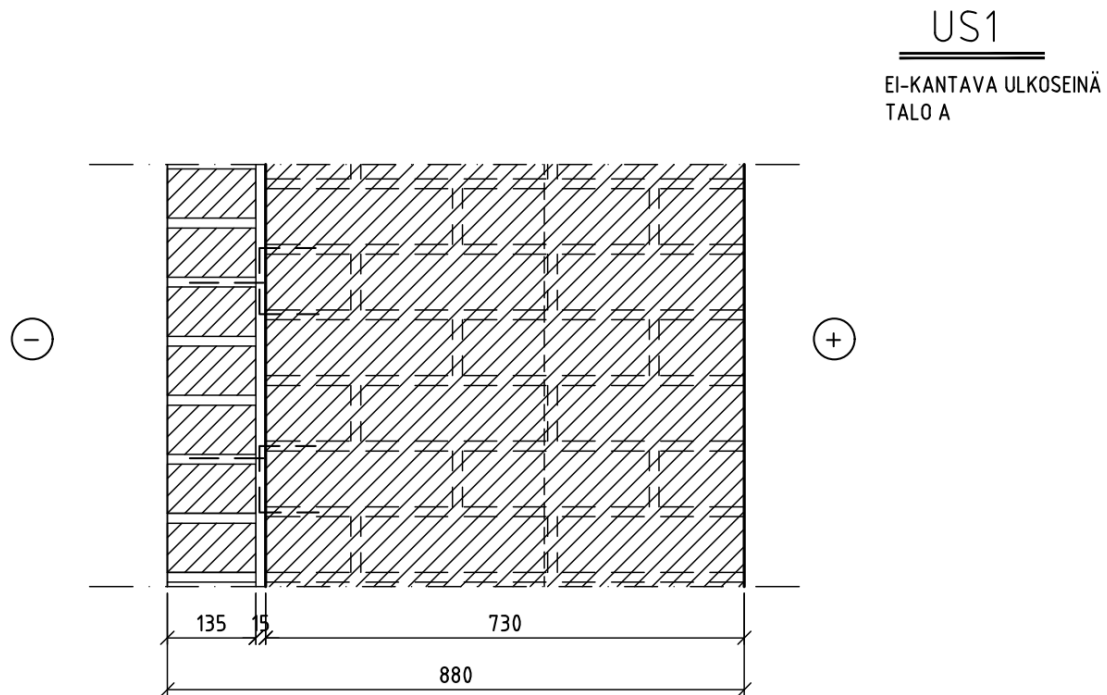
KUVA 12. Ulkoseinärakenteen ja liittymien tarkastelukohtia

3.1 Ulkoseinärakenne

Rakennuksen ulkoseinässä käytetään poltettua tiiltä. Ulkoseinärakenne koostuu ohuesta ulkokuoresta, ilmaraosta ja paksusta sisäkuoresta kuvan 13 mukaisesti. Rakenteen lämmöneristävyys voidaan hyödyntää täysin tekemällä muurausten väliin jäävä ilmaraoko tuulettumattomana. Ilmarako jätetään muurausten väliin kuitenkin katkaisemaan mahdollinen kapillaarinen vedensiirtyminen sisäkuoreen. Väliin mahdollisesti pääseväälle vedelle järjestetään kuitenkin poistumistie seinän alaosaan. Ulkoseinän rakennetyyppi on esitetty tarkemmin liitteessä 1.

Vaikka tiiliseinä toimisi tarvittaessa myös kantavana rakenteena, tehdään kyseisen kohteen ulkoseinät ei-kantavina. Rakennuksen kantavana runkona käy-

tään ulkoseinälinjoilla betonielementtipilareita ja kantavilla väliseinälinjoilla paikalla valettuja teräsbetoniseiniä. Tasoilta kuormat siirretään pystyrungolle käyttäen paikalla valettuja välipohjia. Edellä mainittu runkojärjestelmä mahdollistaa massiivisten muurausten tekemisen sateelta suojattuna.



KUVA 13. Tarkasteltava ulkoseinärakenne A-talossa

3.1.1 Ulkoseinä käytävätilojen kohdalla

Ulkoseinärakenne käytävätilojen kohdalla on luvussa 3.1 kuvatun mukainen (kuva 13). Laskennallisesti erona seinärakenteeseen huoneistojen kohdalla voidaan käytävätiloissa olettaa vallitsevan keskimäärin hieman alhaisempi lämpötila ja kosteuslisä. Tarkastelupiste sijaitsee rakennuksen lounaan puoleisella sivulla, jolloin auringon lämmittävää vaikutusta voidaan myös havainnoida tässä pisteessä.

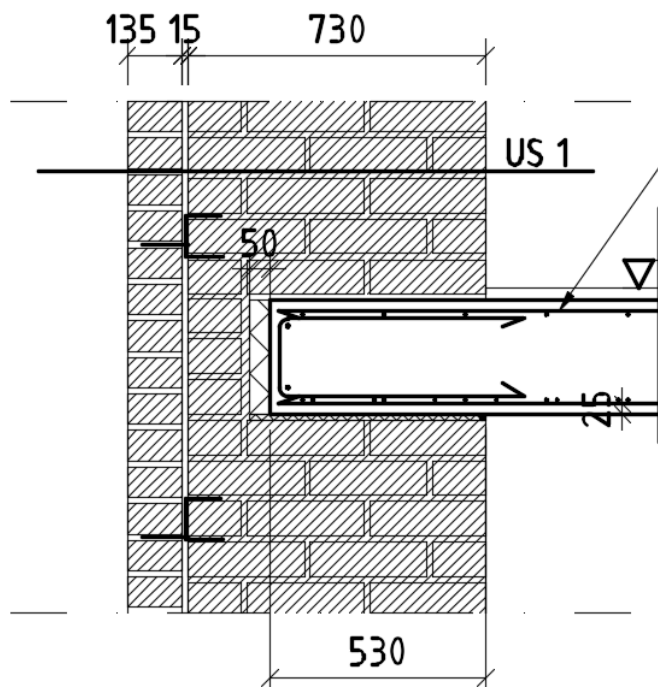
3.1.2 Ulkoseinä pesuhuoneen kohdalla

Pesuhuoneen kohdalla ulkoseinärakenne poikkeaa kuivasta tilasta sisäpuolen pintarakenteiltaan. Kuivissa tiloissa yleisin pintakäsittely tulee todennäköisesti olemaan kevyttasoite ja maalaus, jolloin pintarakenteiden vesihöyrynläpäisevyys

eroaa märkätiloista. Märkätilan seinärakenteeseen tulevan sisäpuolisen vedeneristyksen ja laatoituksen vuoksi pinnan vesihöyrynläpäisevyys on pienempi kuin kuivissa tiloissa. Esimerkiksi diffuusiovastusluvulla verrattaessa, joka ilmoittaa, kuinka paljon tiiviimpää aine on kaasun tunkeutumista vastaan kuin vastaavan paksuinen ilmakerros, on maalien arvo karkeasti luokkaa 500 ja vedeneristysten 1 000. Tarkastelupiste sijaitsee rakennuksen koillisen puoleisella sivulla, joten auringon säteily ei vaikuta rakenteeseen samoin kuin lounaan puolella.

3.2 Välipohjaliittymä

Kyseisen kohteen välipohjat tehdään paikalla valettuina teräsbetoni-laattoina. Muiden kuin 1. kerroksen sisämuurauksen kuormat johdetaan ulkoseinälinjoilla pilareille välipohjalaatan kautta. Kantavina rakenteina käytettävien pilarien koko on 300*300 millimetriä ja niiden sisäpinta tulee ulkoseinärakenteen sisäpintaan. Sisämuurauksen kannatustavan ja leveyden vuoksi välipohjalaatan täytyy työntyä pilareiden yli ulkoseinärakenteeseen. Liittymän periaate on esitetty kuvassa 14.

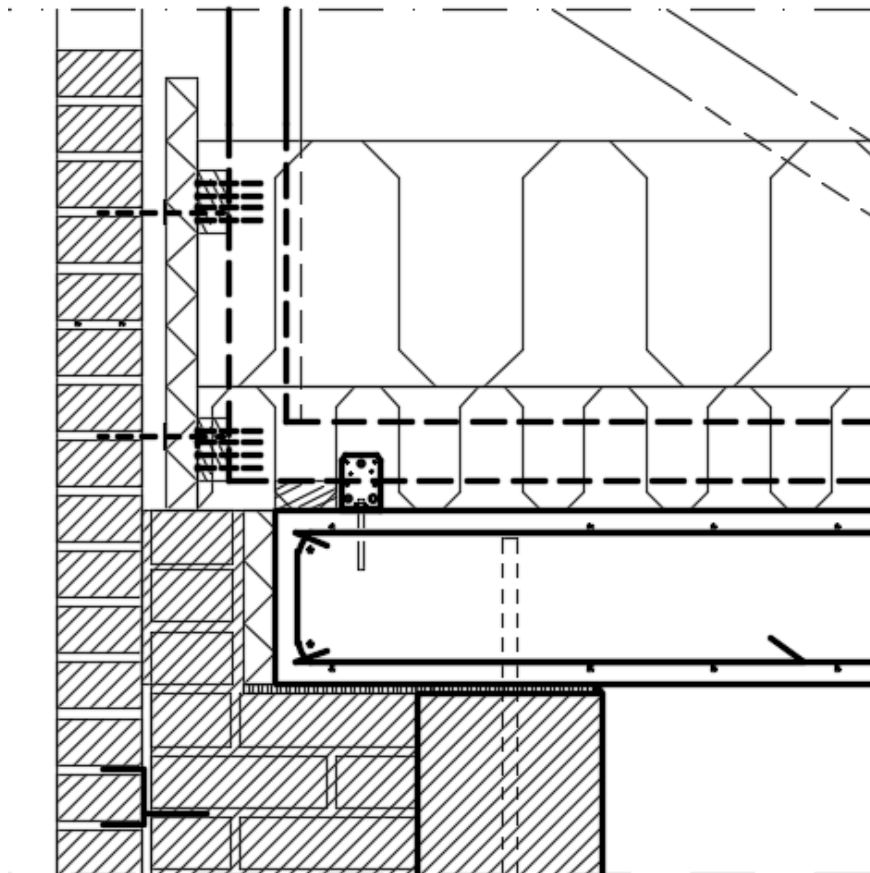


KUVA 14. Välipohjaliittymä

Välipohjan asettuminen liittymässä aiheuttaa rakenteeseen viivamaisen kylmäsil-
lan. Kylmäsilan vaikutusta pyritään vähentämään asentamalla laatan reunaan 50
millimetrin vahvuinen eristelevy. Eristevahvuus ja tiilijako asemoituvat liittymään
siten, että eristelevyn ulkopuolelle saadaan vielä muurattua kokonaisista tiilistä
yhtenäinen kerros, jolloin liittymään ei pääse muodostumaan ilmavirtausta ilma-
raon ja liittymän välillä.

3.3 Yläpohjaliittymä

Myös rakennuksen vesikattorakenteet kannatetaan teräsbetoni-laatalla. Raken-
nuksen vesikattorakenteeksi on valittu ristikkopukein tehty tuulettuva harjakatto.
Yläpohjan kohdalla betonilaatta liittyy seinään kuten välipohjakin. Yläpohjaliit-
tymä ja ristikkopukkien tuenta on suunniteltu kuvan 15 esittämällä tavalla.

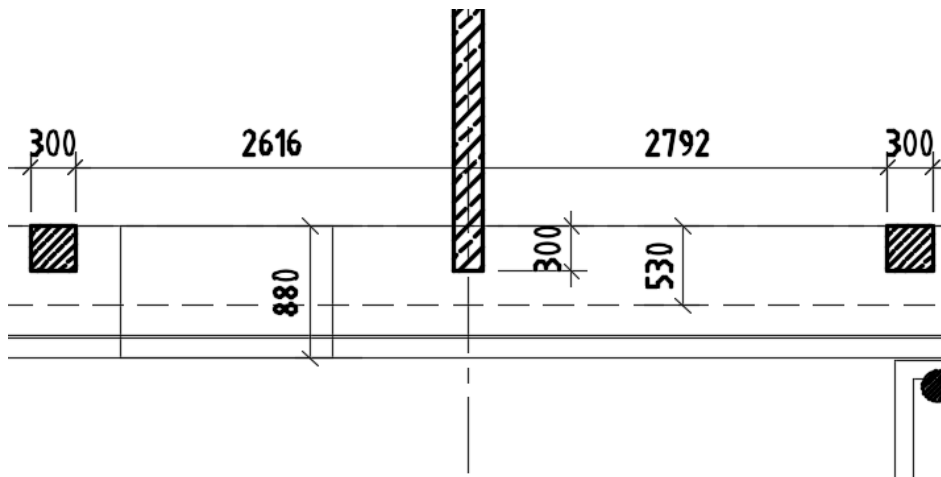


KUVA 15. Ristikkopukkien tuenta ja tarkasteltava yläpohjaliittymä

Yläpohjan eristeenä käytetään yläpohjalaatan päällä 200 millimetrin mineraalivilalevyjä ja levyjen päällä puhallusvillaa 400 millimetriä paksuna kerroksena, jolloin eristekerroksen kokonaisvahvuus on 600 millimetriä.

3.4 Kantavan väliseinän ja ulkoseinän liittymä

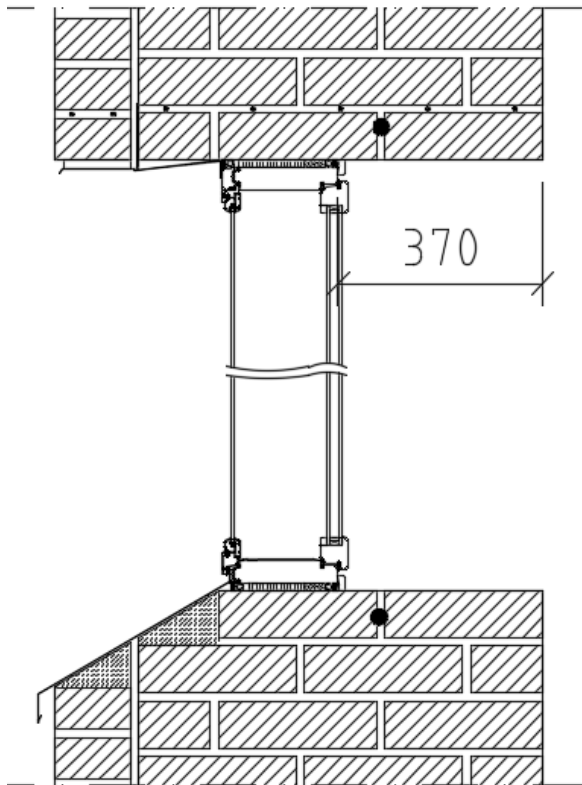
Rakennuksen sisällä kantavat väliseinät tehdään paikalla valettuina, 200 millimetriä vahvoina teräsbetoniseinäinä. Väliseinät viedään ulkoseinärakenteen sisään saman verran kuin pilarit. Näin ollen seinäliittymälle tehtävästä tarkastelusta voidaan arvioida myös pilarien vaikutusta rakenteen lämpö- ja kosteuskäyttäytymiseen. Väliseinäliittymän vaakaleikkausta on havainnollistettu kuvassa 16.



KUVA 16. Väliseinän pään ja pilarien sijainti ulkoseinässä

3.5 Ikkunaliittymä

Kohteessa käytetään kolmilasista ikkunaa. Ikkuna on sisäänpäin aukeava ja sen sisemmässä puitteessa on kaksilasinen umpiolasielementti. Ikkunan asemointi seinässä näkyy kuvassa 17.



KUVA 17. Ikkunan sijoitus seinässä

4 SIMULOINNIT JA TULOKSET

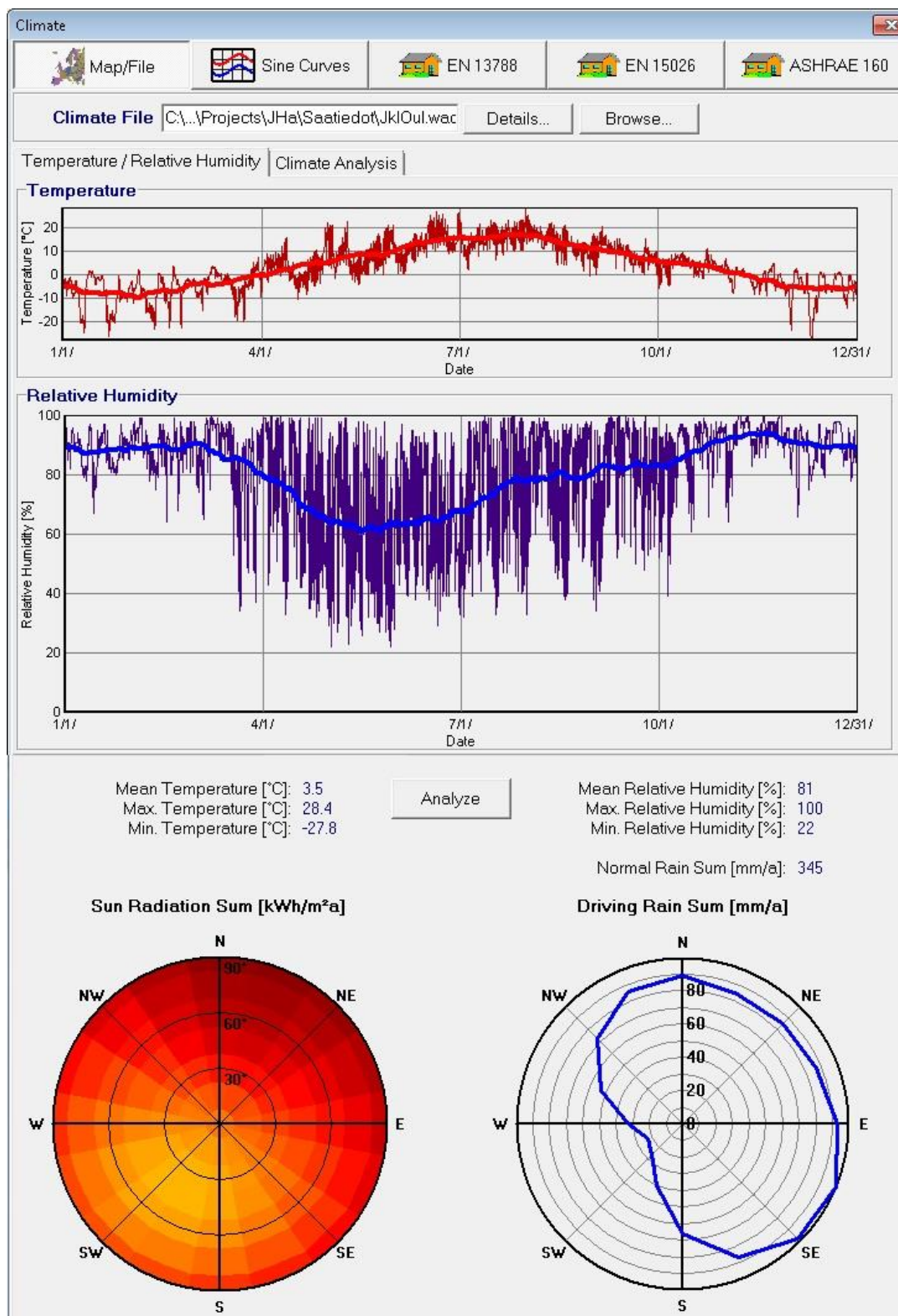
Rakenteiden pääasiallinen laskentatarkastelu tehtiin rakennuksen käyttötilassa, jolloin materiaalit ovat saavuttaneet tasapainokosteuden ympäristönsä kanssa ja rakennuksen käyttö on normaalia. Kuivumistarkasteluiden perusteella voitiin kuitenkin arvioida myös rakentamisen jälkeistä tilannetta.

Simulointien edetessä määritettiin laskentapisteille myös tunnuksot ja sijainnit rakenteissa ja rakennuksessa. Näiden pohjalta muodostettiin kohteeseen mittauspistekartta, jonka avulla tiedetään myöhemmin pisteiden sijainnit.

4.1 Käytettävät ilmastotiedot

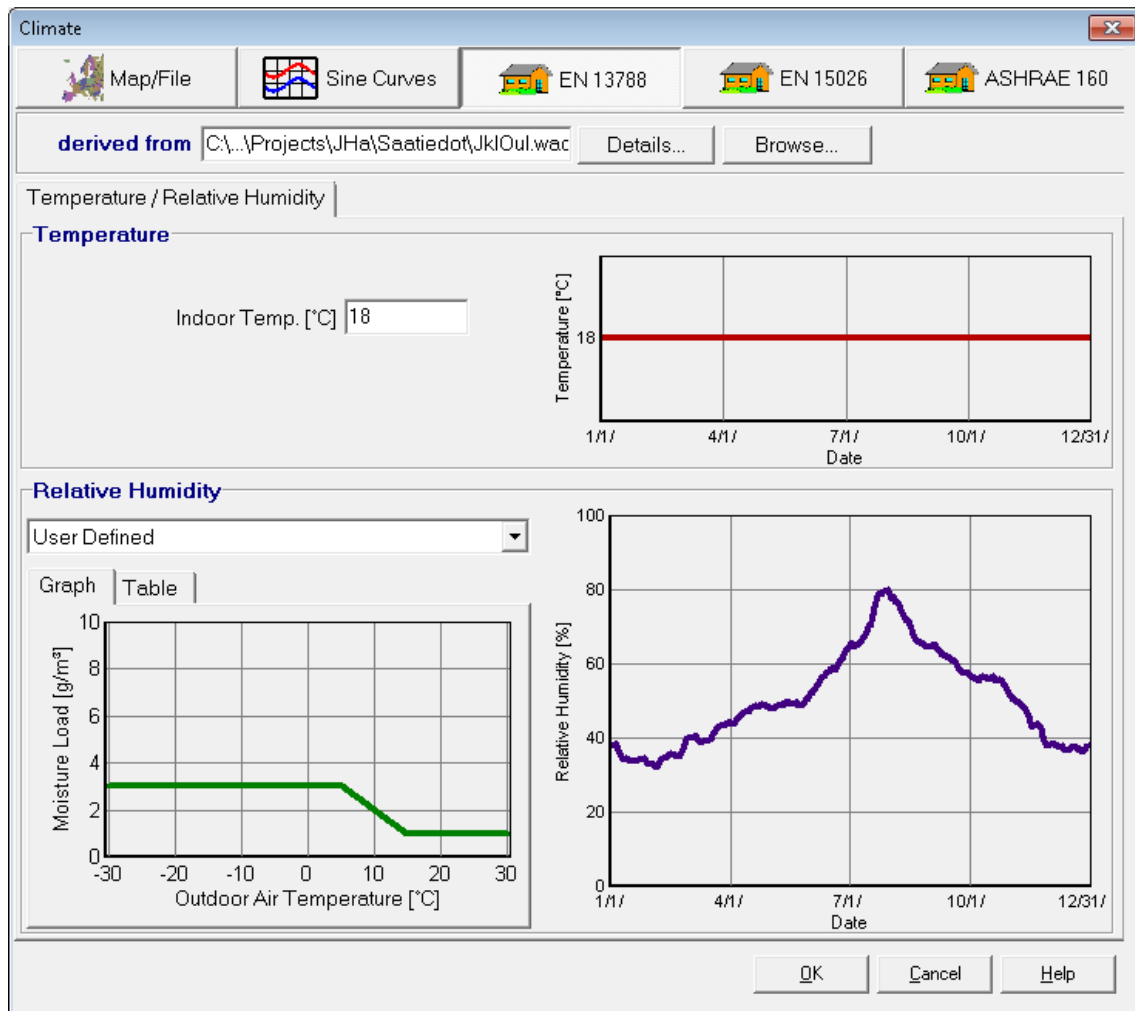
Ilmasto-olosuhteina tarkasteluissa käytettiin ulkoilman osalta itse muokattua ilmastotiedostoa. Tarkoitus oli saada ulkoilman olosuhteet vastaamaan keskimääräistä tilannetta Pohjois-Pohjanmaalla. Tämä toteutettiin ottamalla lähtötiedoiksi Keski-Suomen energialaskennassa käytettävää testivuotta Jyväskylä TRY2012. Testivuosi sisälsi muut laskentaan tarvittavat tiedot, paitsi sateen intensiteetin eli sademäärät sekä ilmakehän vastasäteilyn. Ilmakehän vastasäteily vaikuttaa rakenteen yöaikaiseen jäähtymiseen. Jäähtymiseen vaikuttaa myös pilvisuus. Tietojen puuttumisesta ja laskennan karkeudesta tällä alueella johtuen jätettiin yöaikainen säteilyjäähdyminen pois laskennasta.

Sade sen sijaan haluttiin mukaan laskentaan tiilen vedenimukyvyn vuoksi. Tämä toteutettiin lisäämällä testivuoden tietoihin vuoden sademäärät Oulussa mitatuista tiedoista. Sadetietojen lisäämisen jälkeen sateesta poistettiin vielä lumena tullut sade, joka ei rasita seinäpintoja samoin kuin vesi. Lopputuloksena saatiin aikaan säätiedosto (kuva 18), jossa sateet keskittyvät enemmän koillisen puolelle, mikä osaltaan lisää tarkastelujen varmuutta tällä sivulla.



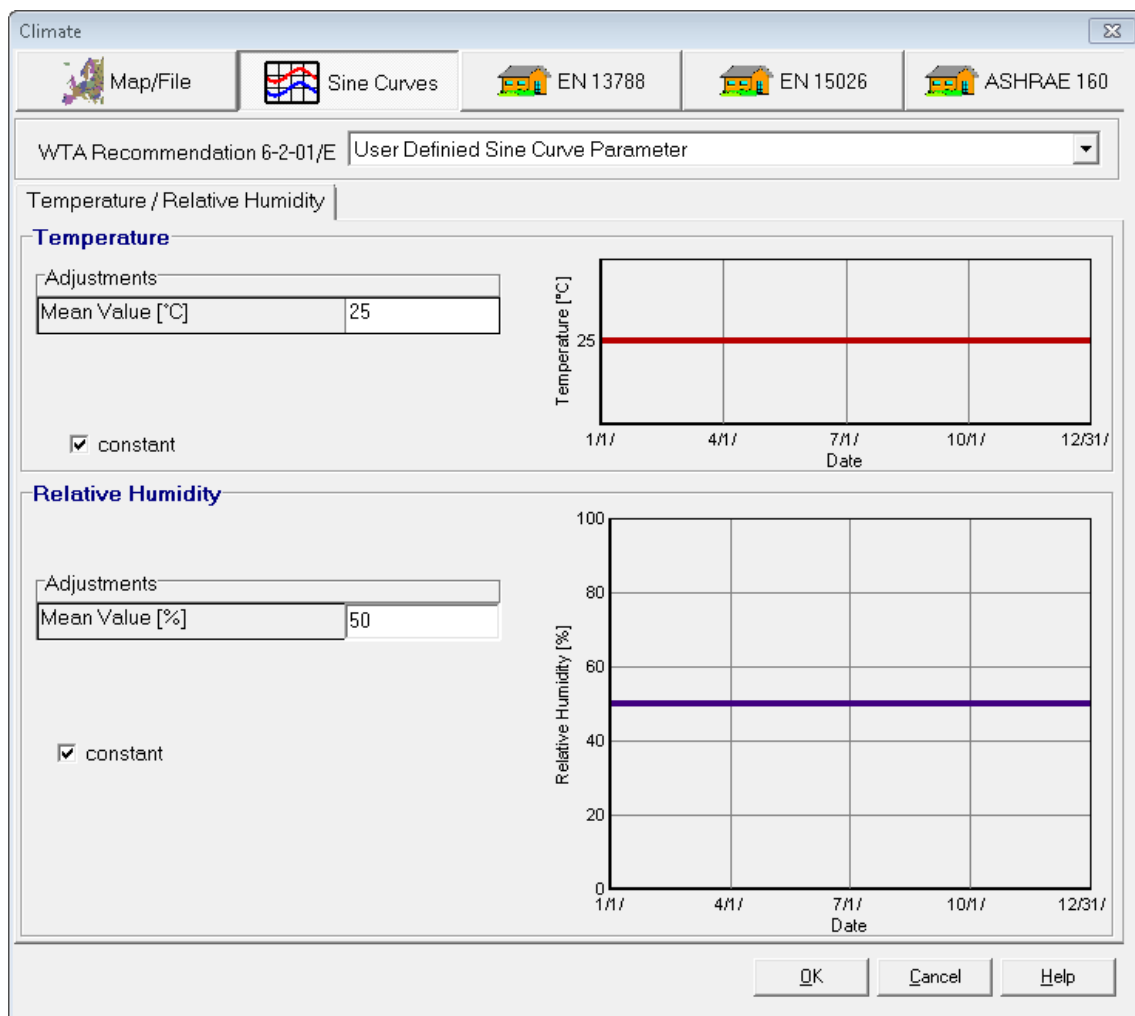
KUVA 18. Laskennassa käytetty säätiedosto

Sisäilman osalta käytettiin lämpötilana 21 celsiusastetta ja kosteuslisänä luokan 2 lisää, joka vastaa normaalia asuinrakennusta. Tästä poikettiin käyttötarkaste-
luissa vain ulkoseinärakenteessa käytävötilöjen kohdalla (kuva 19), jossa lämpö-
tilaksi oletettiin keskimäärin 18 celsiusastetta ja kosteuslisä luokan 1 mukaan.



KUVA 19. Sisäilmasto käytävötilöjen kohdalla

Kuivumistarkasteluissa testattiin sisäilman olosuhteiden vaikutusta kuivumiseen. Tarkastelu tehtiin neljässä eri sisätilan kuivatuslämpötilassa, joita olivat 20, 25, 30 ja 40 celsiusastetta. Suhteellisen kosteuden osalta arvioitiin, että kuivatuksen aikana kaikissa lämpötiloissa suhteellinen kosteus on keskimäärin 50 prosenttia. Lisäksi kuivumista tarkasteltiin normaaleissa olosuhteissa tietyn kuivattamisen jälkeen. Kuvassa 20 näkyvät erään kuivatustilanteen olosuhteet.



KUVA 20. Kuivatusolosuhteet, joissa lämpötila on 25 °C ja RH 50 %

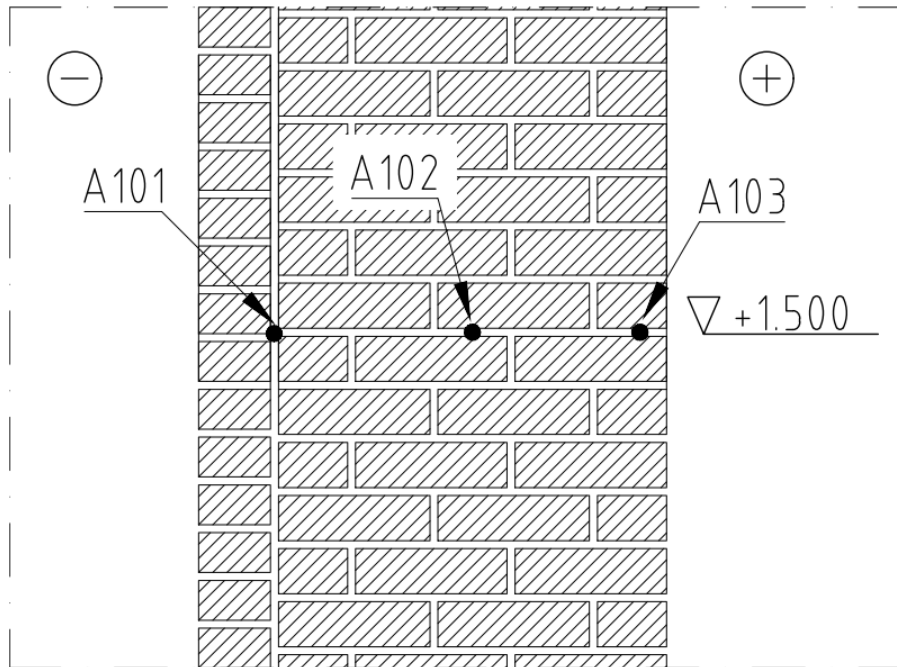
4.2 Ulkoseinärakenne, pisteet A101-A103 ja A104-A106

Ulkoseinärakennetta tarkasteltiin lounaan puoleisella sivulla käytävätilojen kohdalla ja koillisen puoleisella sivulla pesuhuoneen kohdalla. Molemmissa tapauksissa tarkastelupisteitä oli kolme.

Ulkoseinärakenne käytävätilojen kohdalla, pisteet A101-A103

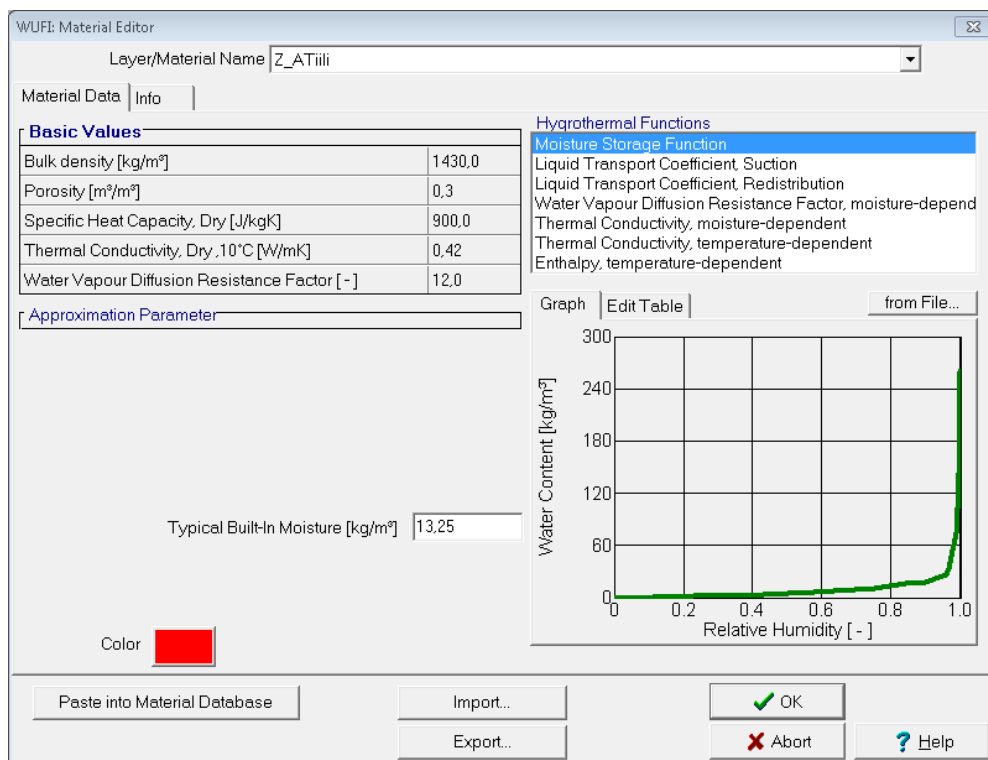
Lounaan puoleisella sivulla mittauspisteet sijoitettiin ilmarakoon ja seinään kuvan 21 mukaisesti. Mittauspisteiden sijoitukseen käytävätilojen kohdalle vaikutti osittain myös se, että tällä sivulla rakennuksessa on paljon ikkunoita sekä ulkoseinään liittyviä pilareita ja väliseiniä, jolloin yhtenäistä muurausta jää enemmän

vain tälle kohtaa. Näin ollen tässä pisteessä muut rakenteet vaikuttavat vähiten seinän tiilirakenteen toimintaan.



KUVA 21. Mittauspisteet A101-A103

Materiaalikerrokset tässä rakenteessa olivat tiilimuuraus ja ilmarako. Tiilimuurauksen materiaaliominaisuudet (kuva 22) määritettiin muokkaamalla ohjelmasta löytyvää tiilimateriaalia siten, että se vastasi lämmönjohtavuudeltaan A-talon tiilimuurausta. Samaa muokattua tiilimuurausta käytettiin myöhemmin myös muissa simuloinneissa. Ilmaraon materiaalina käytettiin ohjelmasta löytyvää ilmakerrosta. Lisäksi sisäpintaan (kuva 23) oletettiin sd-arvon avulla tasoite sekä maali-kerros ja pinnan lämmönsiirtokertoimenä käytettiin arvoa $7,69 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, mikä vastaa pintavastuksen arvoa $0,13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$.



KUVA 22. A-talon tiilimuurauksen perusominaisuudet

Surface/Climate - SISÄPINTA

Surface Coefficients | Climate

Adiabatic/System Border..... ☐

Treat as Indoor Surface..... ☒

Sd Value [m]..... 0.13 User defined

Heat Transfer Coefficient [W/m²K] 7.69

Wind Dependent ☐

Short-Wave Radiation Absorptivity [-] No Absorption/Emission

Long-Wave Radiation Emissivity [-] Details ...

Rain Reduction Factor [-] 0

Surface Type Wall

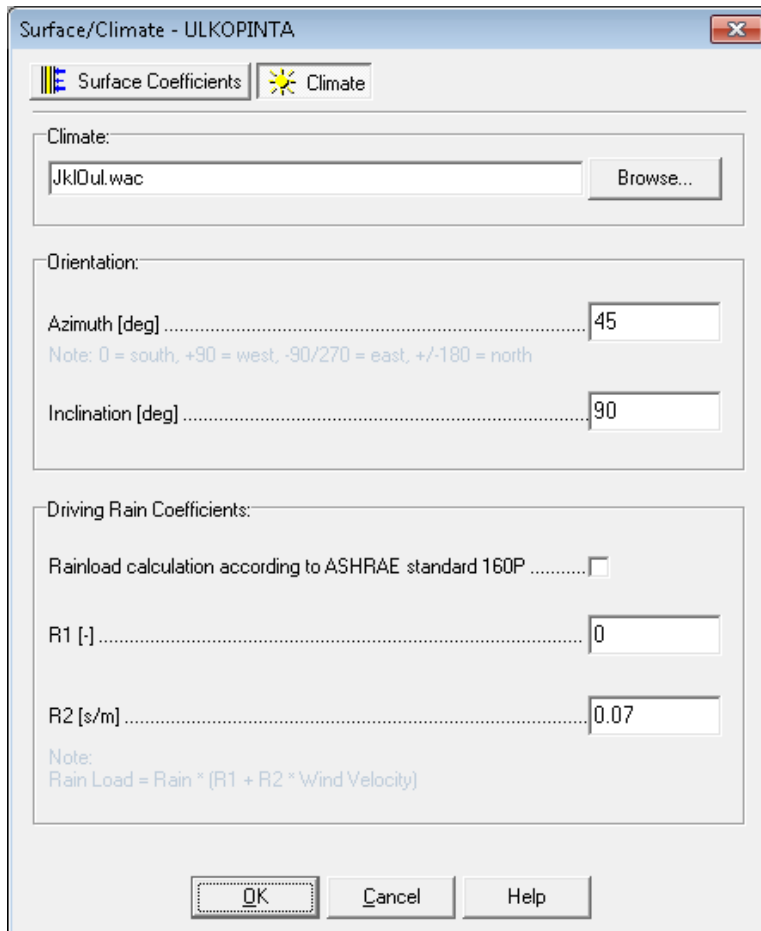
Surface Group

Color in Model

Buttons: OK, Cancel, Help

KUVA 23. Sisäpinnan ominaisuudet

Ulkopinnan osalta malli sijoitettiin lounaaseen (kuva 24) ja pintavastuksena käytettiin arvoa 0,04 m²K/W. Tiilen värin ollessa vaalea käytettiin lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokertoimena arvoa 0,3 ja tiilen huokoisuudesta johtuen sadeveden adsorptiokertoimena arvoa 0,7. Viistosateen osuudeksi oletettiin 0,07 s/m. Samoja arvoja käytettiin myös muissa simuloinneissa tiilimuuraukselle.

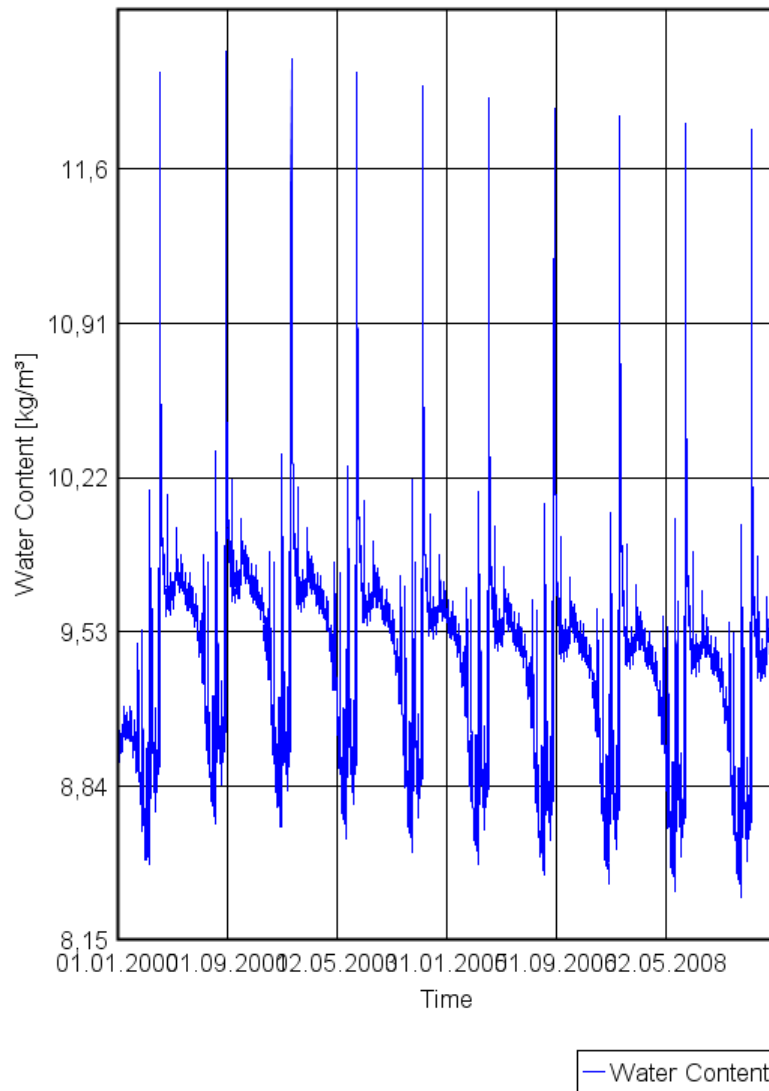


KUVA 24. Mallin sijoitus ympäristöön ja viistosadekerroin

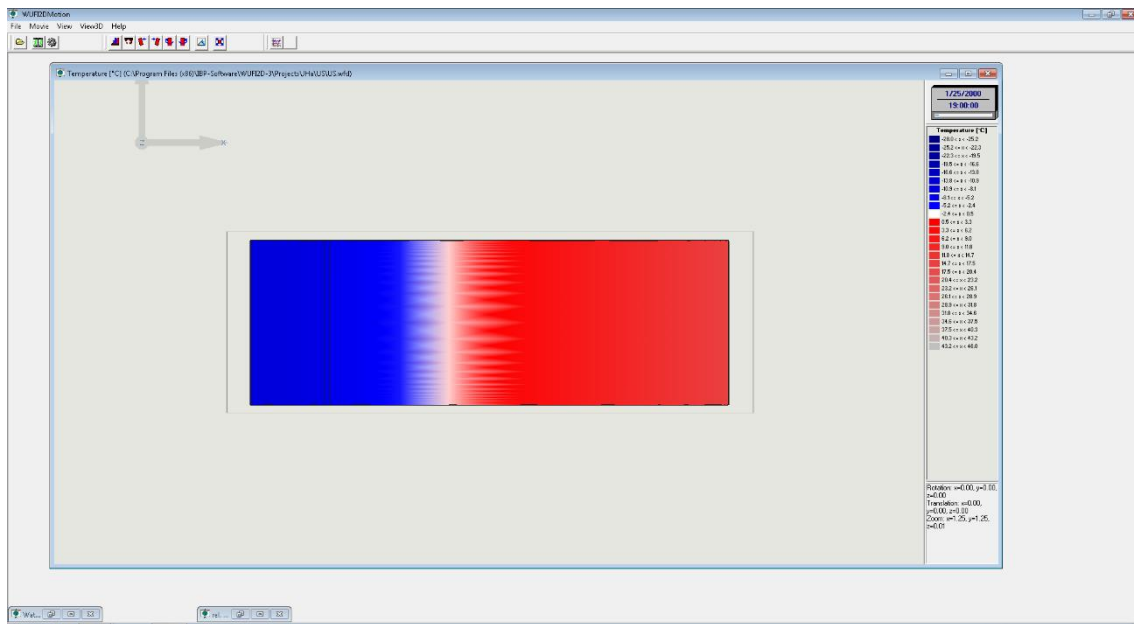
Simulointia suoritettiin, kunnes lämpö- ja kosteusolosuhteet rakenteessa olivat tasoittuneet. Laskennan jälkeen tarkistettiin virheiden määrä ohjelmasta löytyvällä analysointityökalulla sekä rakenteen kokonaiskosteusmäärän tasoittuminen (kuva 25). Tuloksista otettiin vuoden data määrättyistä pisteistä lämpötilan ja suhteellisen kosteuden osalta. Nämä tulokset tulostettiin sekä kuvina että tekstitiedostoina. Lisäksi tarkasteltiin rakenteen käyttäytymistä ohjelmasta löytyvällä WUFI 2D Motion -työkalulla. Tällä työkalulla voitiin tarkastella lämpö- ja kosteus-

olosuhteita koko kokoonpanon osalta. Kuvassa 26 on esitetty esimerkiksi seinärakenteen 0-raja valkoisella kovimpien pakkasten aikaan kyseisessä simulaatiossa.

Water Content



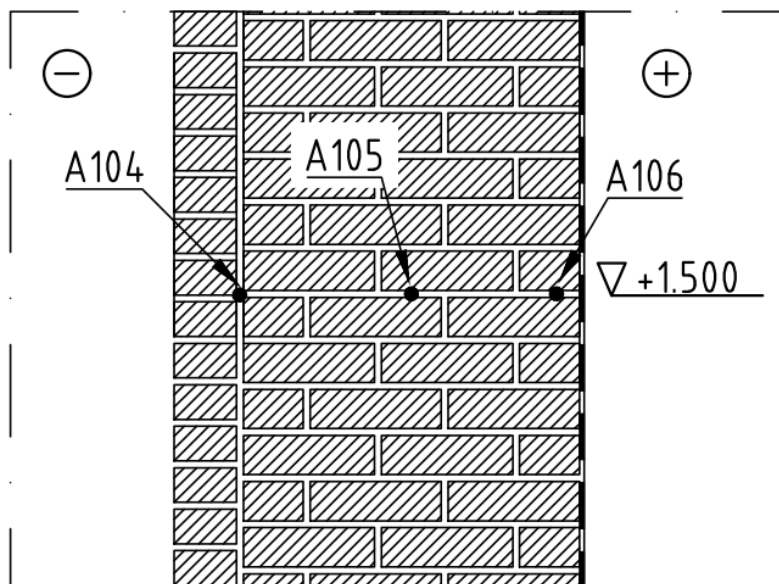
KUVA 25. Rakenteen tasoittunut kokonaiskosteus



KUVA 26. Ulkoseinärakenteen 0-raja kovimmilla pakkasilla

Ulkoseinärakenne pesuhuoneen kohdalla, pisteet A104-A106

Koillisen puoleisella sivulla, pesuhuoneen kohdalla, mittauspisteet sijoitettiin ilmarakoon ja seinään kuvan 27 mukaisesti. Laskenta suoritettiin vastaavalla tavalla kuin lounaan puolella, mutta tässä tarkastelussa sisäpinnalle määriteltiin s_d -arvon avulla vedeneriste ja laatoitus (kuva 28) sekä ulkopinta suunnattiin koilliseen.



KUVA 27. Mittauspisteiden sijainti koillisen puoleisella sivulla

Surface/Climate - SISÄPINTA

Surface Coefficients Climate

Adiabatic/System Border.....☐

Treat as Indoor Surface.....☒

Sd Value [m].....6 User defined

Heat Transfer Coefficient [W/m²K]7.69

Wind Dependent☐

Short-Wave Radiation Absorptivity [-] No Absorption/Emission

Long-Wave Radiation Emissivity [-] Details ...

Rain Reduction Factor [-]0

Surface TypeWall

Surface Group

Color in Model

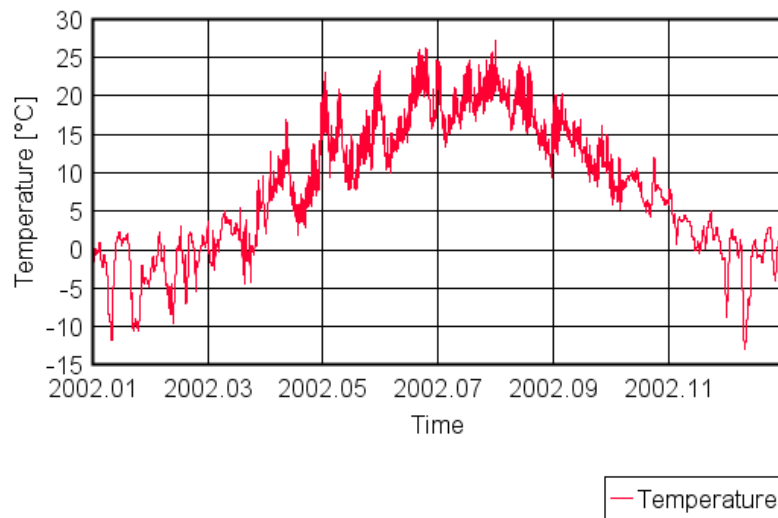
OK Cancel Help

KUVA 28. Sisäpinnan ominaisuudet pesuhuoneen kohdalla

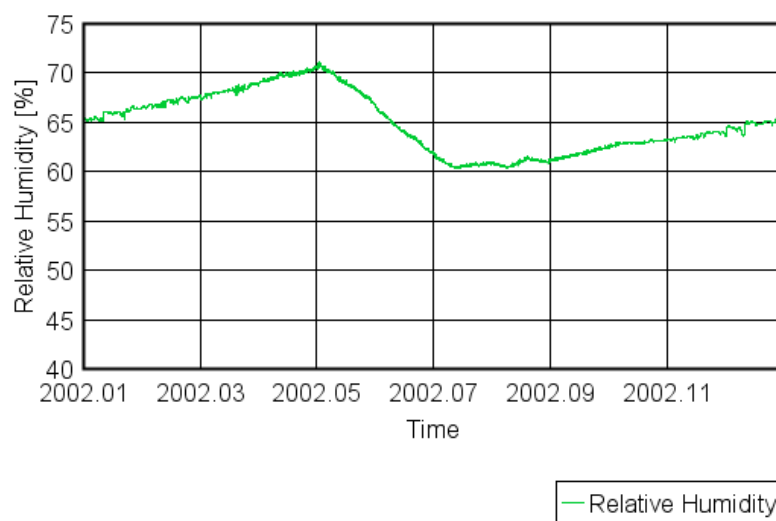
Tulosten analysointi

Näissä tarkasteluissa eniten eroa näkyi oletettavasti ilmaraon olosuhteissa. Lounaan puoleisella sivulla auringon lämmittävä vaikutus näkyi hieman korkeampina lämpötiloina sekä alhaisempina suhteellisen kosteuden arvoina. Koillisen puolella suhteelliset kosteudet nousivat korkeammalle myös sateista johtuen. Myös sisäpuolen lämpötila ja kosteudet vaikuttivat luultavasti tuloksiin hieman. Kuvista 29 ja 30 nähdään erot rakenteiden välillä. Epävarmuutta tuloksiin aiheutti laskentaohjelman tapa käsitellä tuulettumattoman ilmaraon kosteuskapasiteettia.

A101

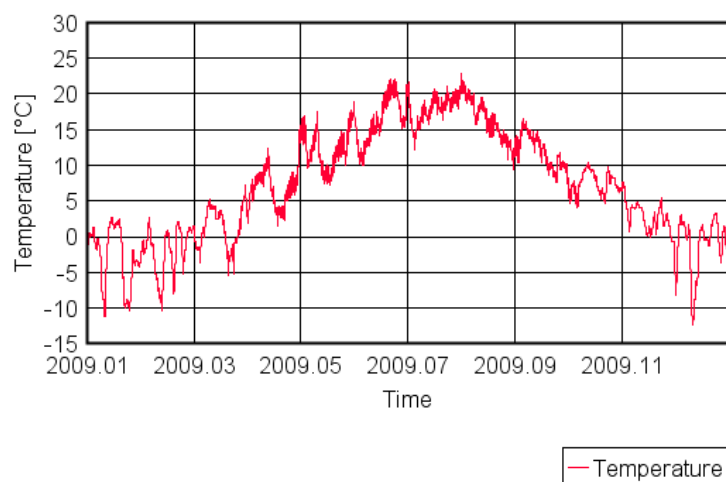


Relative Humidity

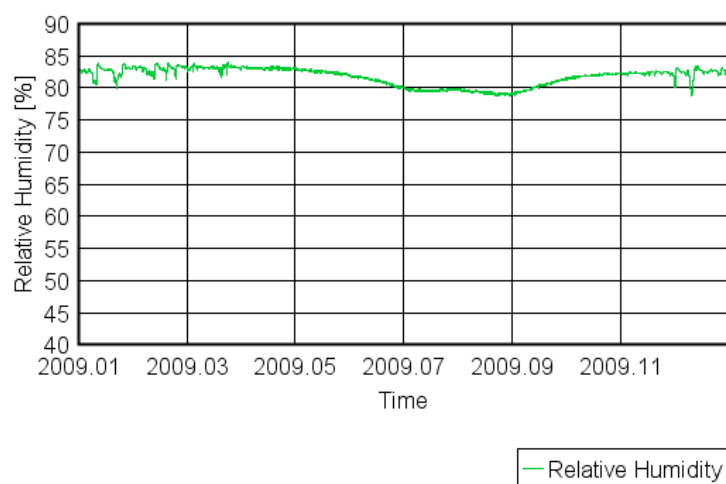


KUVA 29. Lounaan puoleisen ilmaraon laskentatulokset

A104



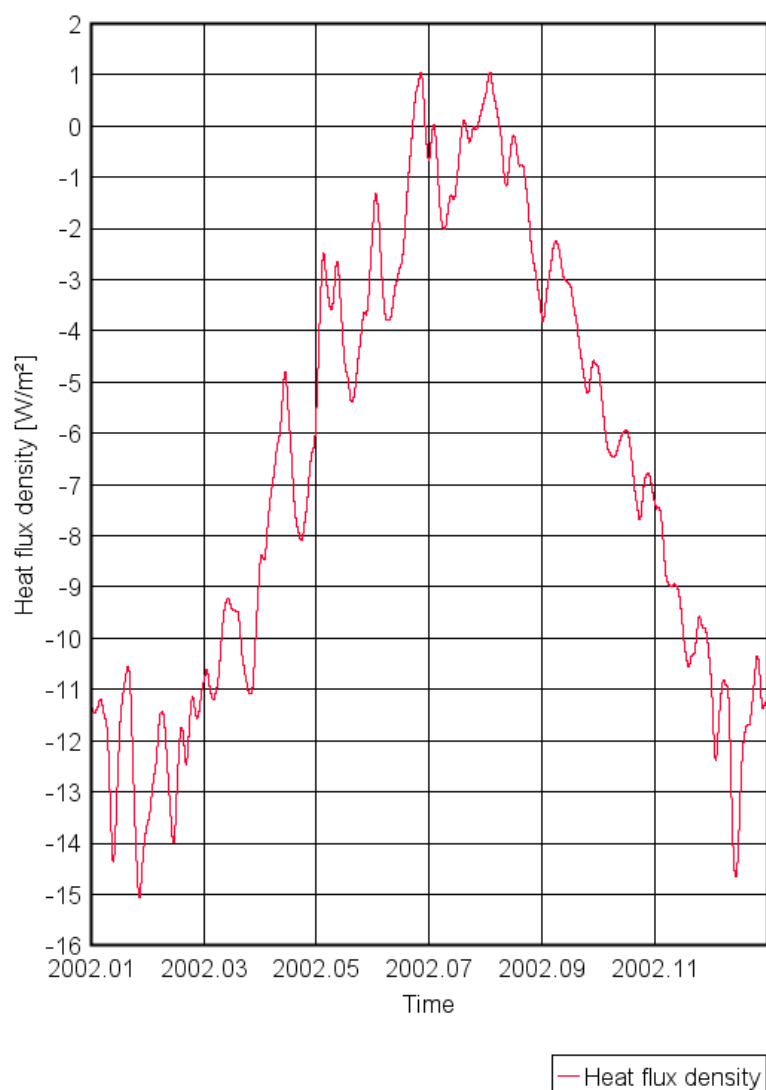
Relative Humidity



KUVA 30. Koillisen puoleisen ilmaraon laskentatulokset

Näiden lisäksi tuloksista huomattiin, että lämpövirran suunta kääntyy lämpimämmällä eli lounaan puolella kesällä hetkellisesti myös sisään päin. Tämä näkyy kuvassa 31, kun lämpövirran arvot käyvät positiivisella puolella. Tulostiedoston arvot riippuvat simuloitavan rakenteen mallinnuksesta origoon nähden. Lisäksi täytyy muistaa, että sisäpinnalle määritetyt ominaisuudet pitävät pinnan lämpötilan koko laskennan ajan vakiona.

Vuoden lämpövirta lounaan puolella



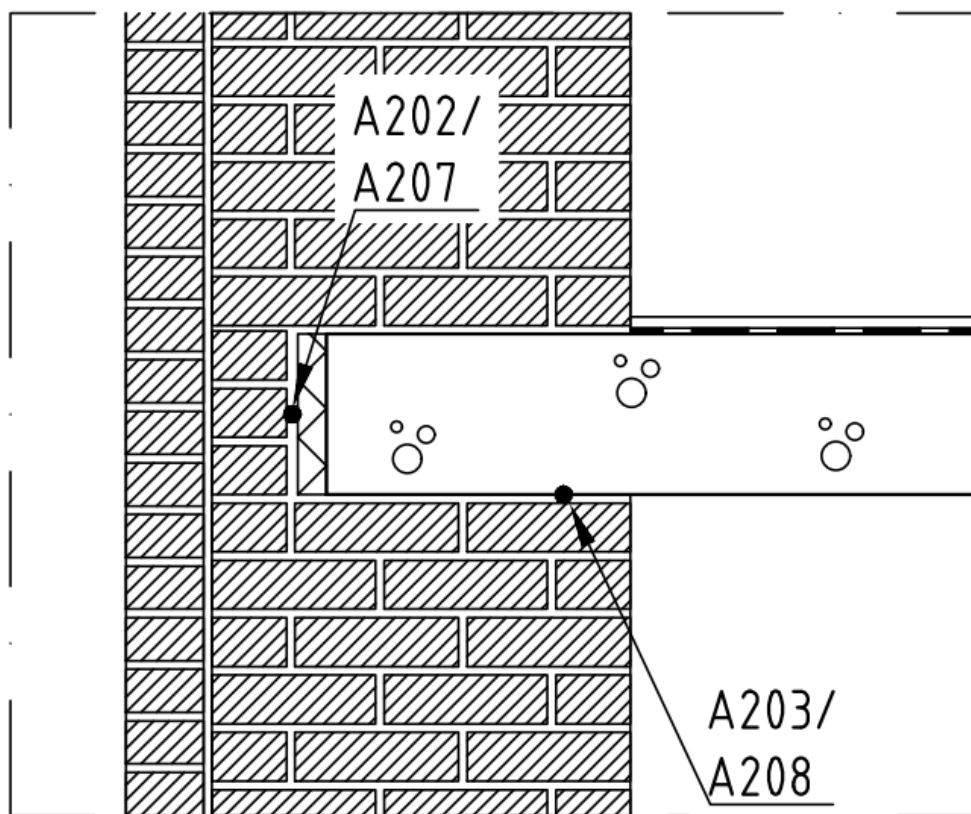
KUVA 31. Vuoden lämpövirta ulkoseinärakenteen läpi lounaan puolella

Koska koillisen puoleisen mittapisteen A104 suhteelliset kosteudet nousivat korkeaksi ja lämpötila oli pisteessä suuren osan vuodesta lämpimän puolella, päätettiin tälle pisteelle tehdä varmuuden vuoksi myös homeutumistarkastelu käyttäen apuna homemallia. Mallia varten tuloksista yhdistettiin lämpötilat ja suhteelliset kosteudet samaan tiedostoon, josta ne syötettiin homemalliin. Tämän jälkeen mallista saatiin homeindeksin arvoksi ilman taantumaa 0,4 ja taantuma huomioituna 0, eli ongelmia ei tämän suhteen pitäisi esiintyä. Homeindeksin tulokset on esitetty liitteessä 2.

4.3 Välipohjaliittymä, pisteet A202/A207 ja A203/A208

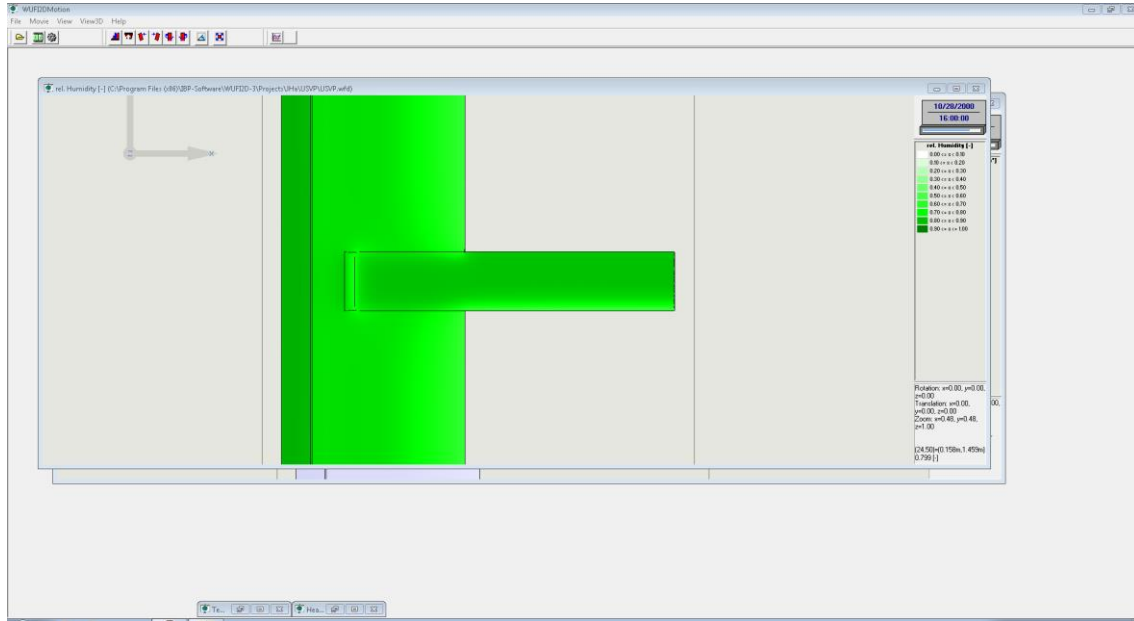
Välipohjaliittymän mittauspisteet sijoitettiin koillisen ja lounaan puolelle kuvan 32 tavalla. Pisteet A202 ja A203 ovat lounaan puoleisia ja A207 ja A208 koillisen puoleisia. Laskennallisesti tarkasteltiin myös tilannetta lämmöneristeen sisäpuolella.

Laskenta suoritettiin molempiin ilmansuuntiin kuten ulkoseinärakenteenkin kohdalla, mutta nyt mukana oli uusina materiaaleina EPS-eriste ja betoni. Näille käytettiin ohjelmasta löytyviä arvoja. Niiden lisäksi välipohjalaatan yläpintaan määritettiin sd-arvon (50) avulla muovipohjainen askeläänieriste. Sd-arvo 50 vastaa kahden muovin välissä olevaa styroksirakeista askeläänieritettä. Pintojen lämmönvastuksina käytettiin Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaisia arvoja.

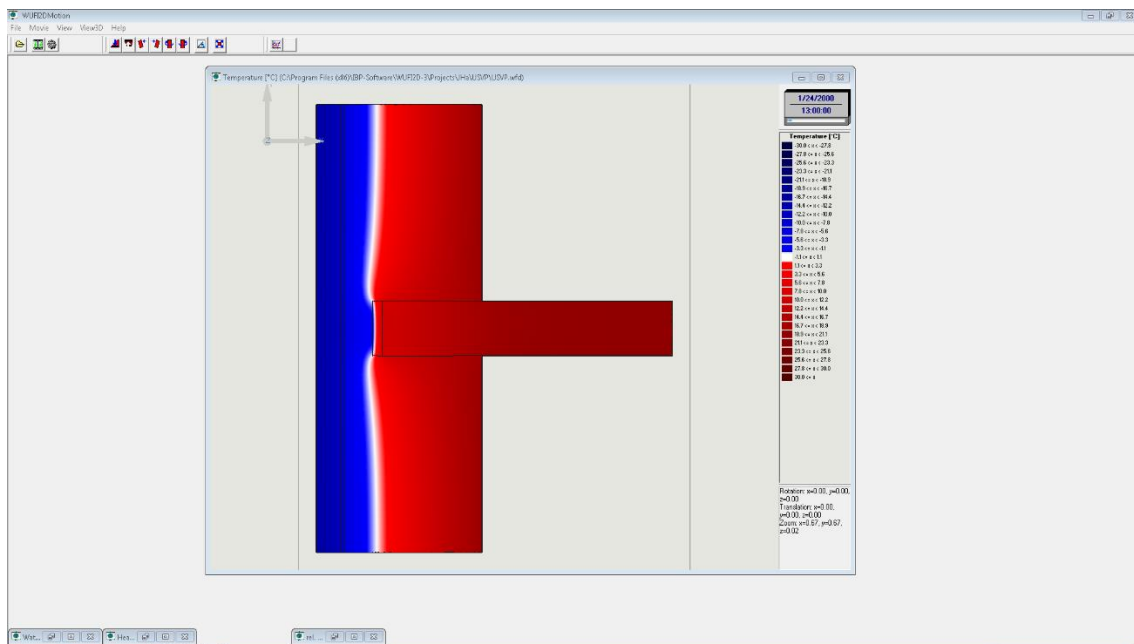


KUVA 32. Välipohjaliittymän mittauspisteet

Tässäkin tapauksessa laskentaa jatkettiin, kunnes olosuhteet olivat tasoittuneet. Tasoittumisen jälkeen tuloksista otettiin tiedot vuoden ajalta ja rakennetta tutkittiin myös videotyökalun avulla. Kuvasta 33 nähdään, miten rakenteen kosteusprofiili muodostuu rakenteen kuivuessa, ja kuvasta 34, miten välipohjan työntyminen ja eristys vaikuttavat lämpötilajakaumaan rakenteen sisällä kovimmilla pakkasilla.



KUVA 33. Välipohjalaatta kuivuu pääosin alaspäin pinnoituksen jälkeen

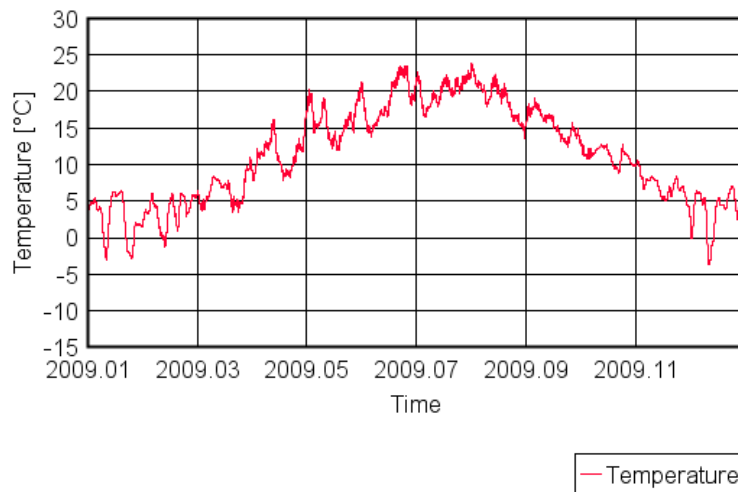


KUVA 34. Lämpötilajakauma välipohjaliittymässä, 0-raja näkyy valkoisena

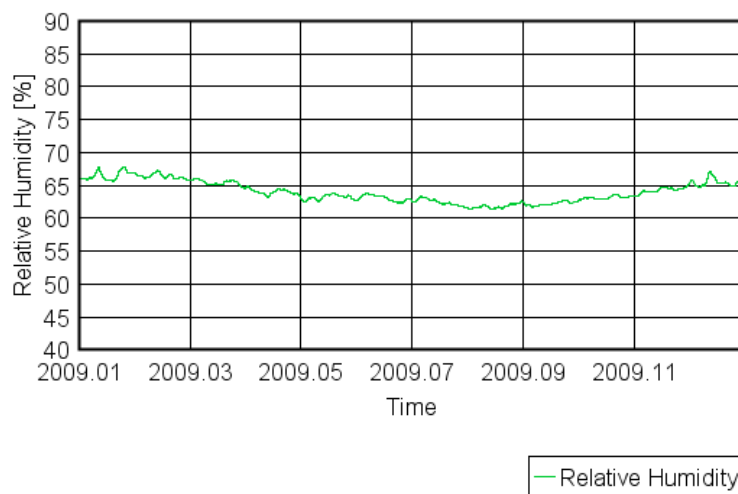
Tulosten analysointi

Välipohjaliittymän osalta tulokset noudattivat samaa kaavaa kuin ulkoseinära-
kenne. Lounaan puoleisella sivulla lämpötilat pysyivät hieman korkeampina ja
suhteellinen kosteus alhaisempana kuin koillisen puolella. Ilmansuunta vaikutti
tuloksien mukaan kuitenkin suhteellisen paljon suhteellisiin kosteuksiin tarkaste-
lupisteissä. Kun lounaan puolella suhteellinen kosteus mittauspisteessä A202 py-
syi vuoden ympäri noin 65 prosentissa, oli se koillisen puolella pisteessä A207
lähempänä 80 prosenttia koko vuoden. Kuvissa 35 ja 36 näkyvät pisteiden A202
ja A207 vuoden tulokset käyttötilassa.

A202

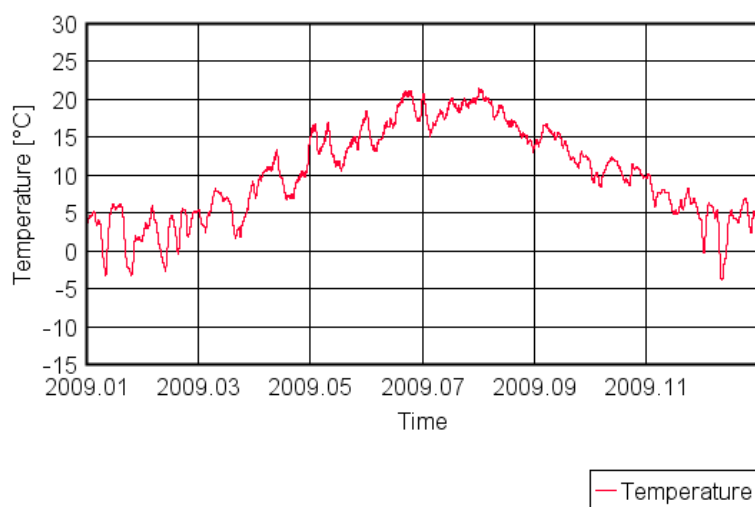


Relative Humidity

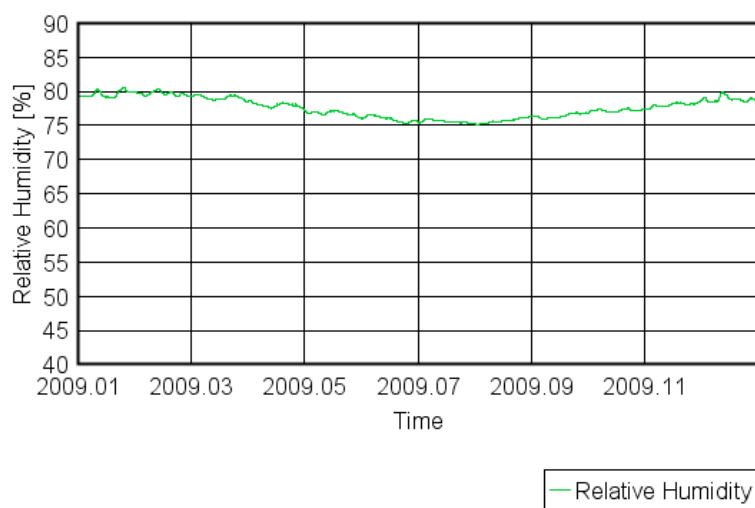


KUVA 35. Mittauspiste A202 vuoden tulokset käyttötilassa

A207



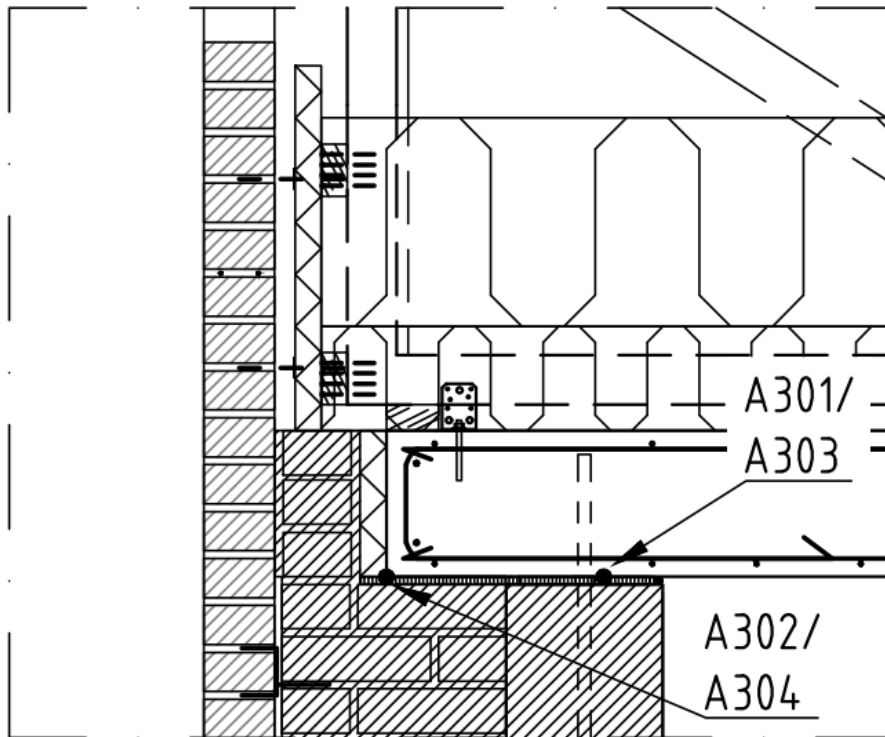
Relative Humidity



KUVA 36. Mittauspisteen A207 vuoden tulokset käyttötilassa

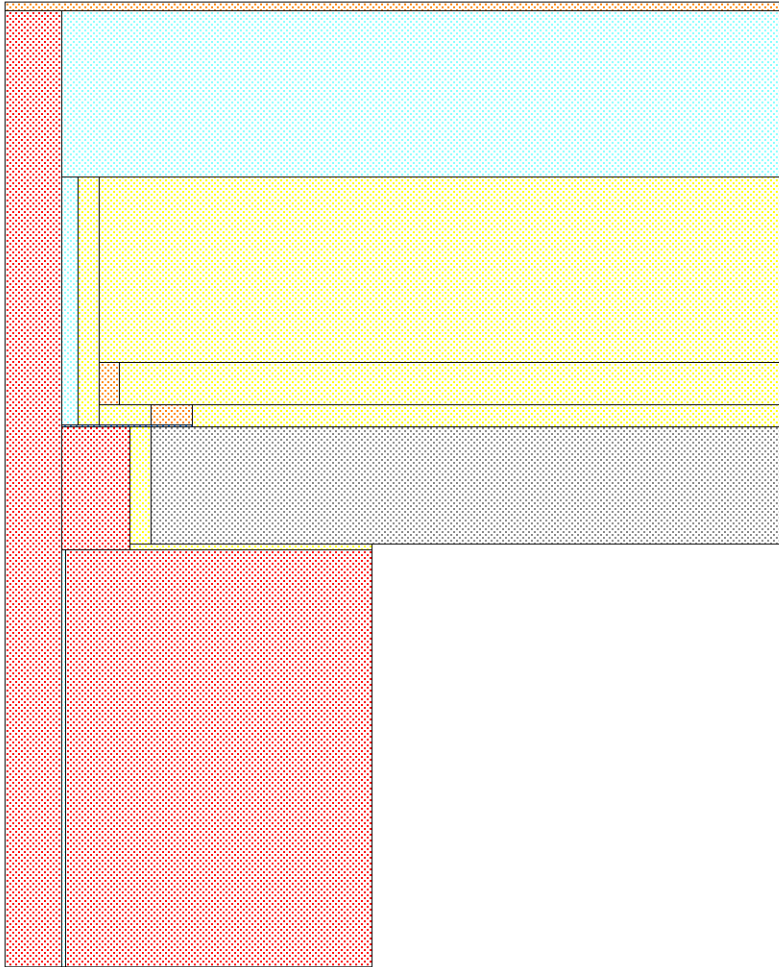
4.4 Yläpohjaliittymä, pisteet A301/303 ja A302/A304

Yläpohjaliittymän mittauspisteet sijoitettiin koillisen ja lounaan puolelle kuvan 37 mukaisesti. Pisteet A301 ja A302 ovat lounaan puoleisia ja A303 sekä A304 koillisen puoleisia. Laskennallisesti tarkasteltiin tilannetta myös muuallakin yläpohjassa.



KUVA 37. Yläpohjaliittymän mittauspisteet

Yläpohjaliittymän monimutkaisuudesta johtuen laskenta-aika tässä simuloinnissa venyi todella pitkäksi, minkä vuoksi laskenta suoritettiin vain kerran. Koska simulointi tehtiin viimeisenä, voitiin tuloksien perusteella arvioida jo kokemuksen perusteella tilannetta jonkin verran myös muualla. Yläpohjaliittymän yksinkertaistettu laskentamalli on esitetty kuvassa 38.

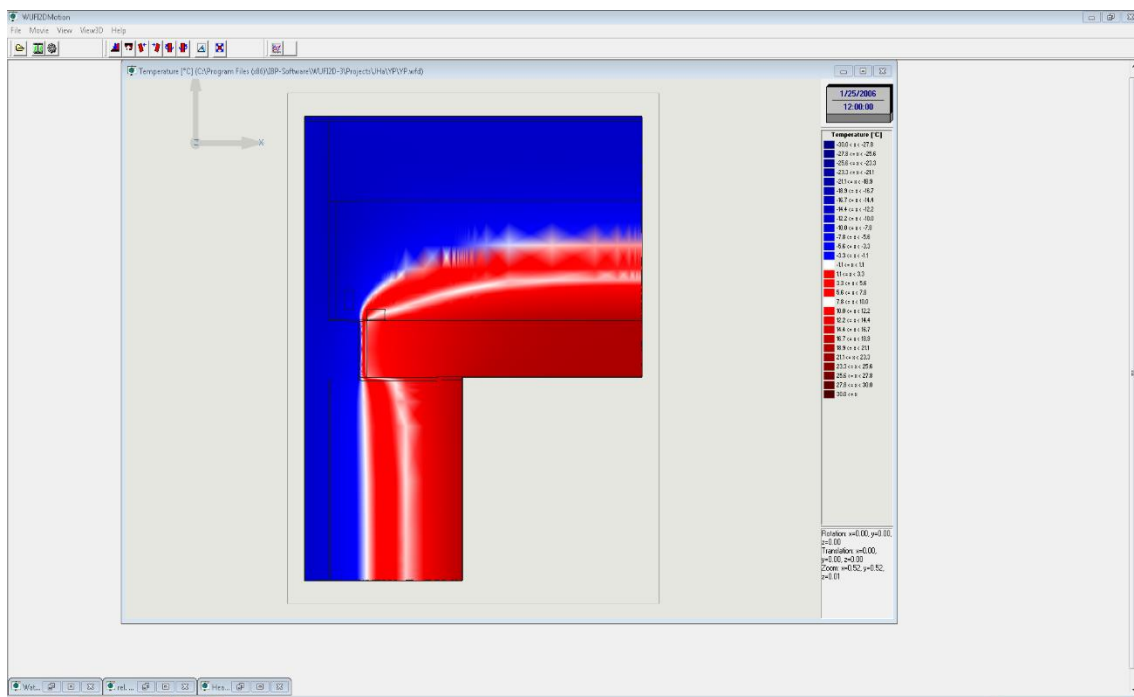


KUVA 38. Yläpohjaliittymän laskentamalli

Laskentamallissa oli uusina materiaaleina puu ja vaaleanharmaa bitumihuopa, joille käytettiin ohjelmasta löytyviä arvoja. Yläpohjan ilmatilalle määritettiin ilmanvaihtuvuus 5 kertaa tunnissa ja ilmanvaihtolähteeksi ulkoilma. Simuloinnin jälkeen tuloksia tutkittiin vastaavalla tavalla kuin muissa rakenteissa.

Tulosten analysointi

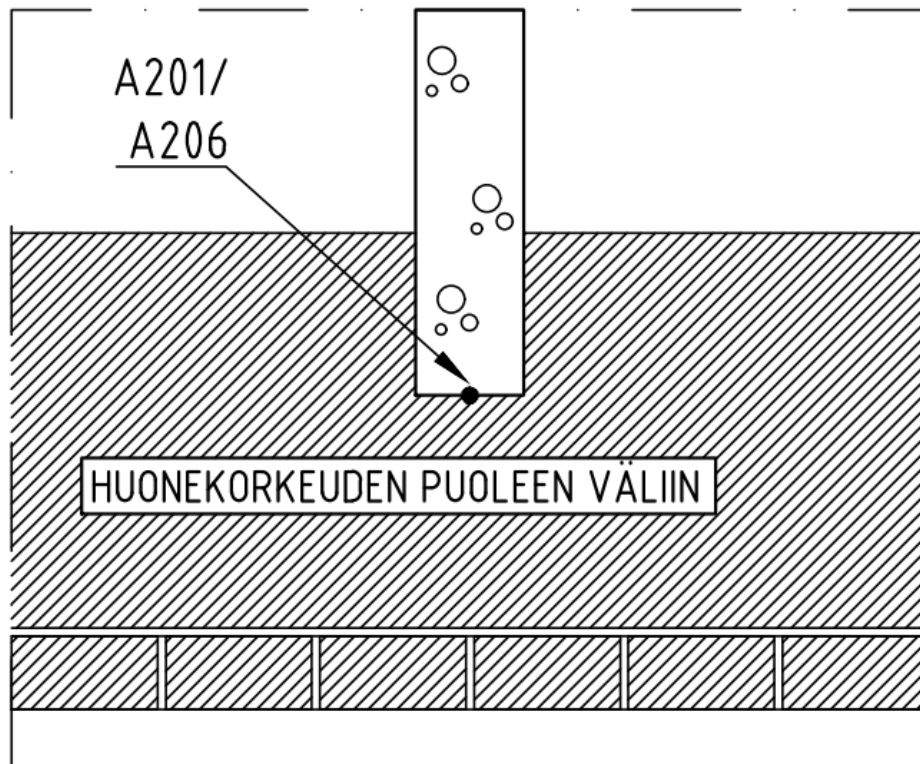
Tuloksissa ei käyttötilassa esiintynyt ongelmia. Pisteessä A302, joka on kylmemmissä olosuhteissa, oli suhteellinen kosteus keskimäärin 65 prosenttia vuoden ympäri ja lämpötila noin 5 - 20 celsiusastetta. Tästä päätellen ei ongelmia pitäisi esiintyä yläpohjaliittymässä toisellakaan sivulla. Liittymän 0-raja vaihteli vuoden aikojen mukaan ja oli kovimmilla pakkasilla kuvan 39 mukainen. Kuvassa lähempänä ulkopintaa sijaitseva valkoinen raja on 0-raja.



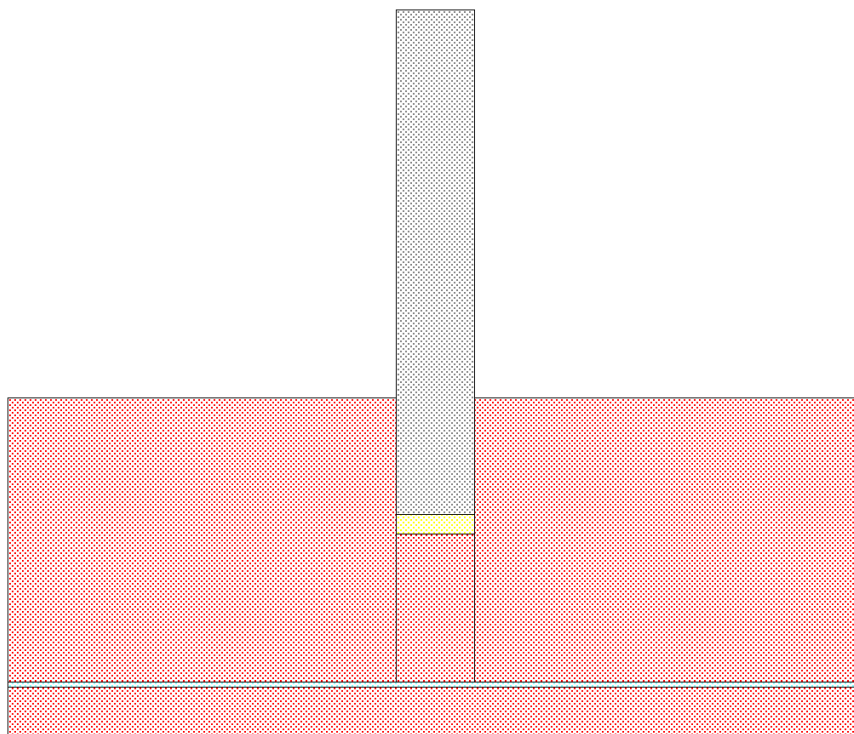
KUVA 39. Yläpohjaliittymän 0-raja kovilla pakkasilla

4.5 Kantavan väliseinän ja ulkoseinän liittymä, pisteet A201/A206

Kantavan väliseinän ja ulkoseinän välisen liittymän mittauspisteet sijoitettiin koillisen ja lounaan puolelle kuvan 40 mukaisesti. Piste A201 on lounaan puoleinen ja piste A206 koillisen puoleinen. Kantavan väliseinän lisäksi simuloinnin perusteella voidaan arvioida pilarien kohtia ulkoseinässä. Normaalitilanteen lisäksi tehtiin pieni vertailusimulointi, jossa liittyvän seinän päähän mallinettiin 50 millimetrin vahvuinen EPS-eriste. Kuvassa 41 on esitetty liittymän laskentamalli, kun liittymässä on eriste.



KUVA 40. Väliseinäliittymän mittauspisteet

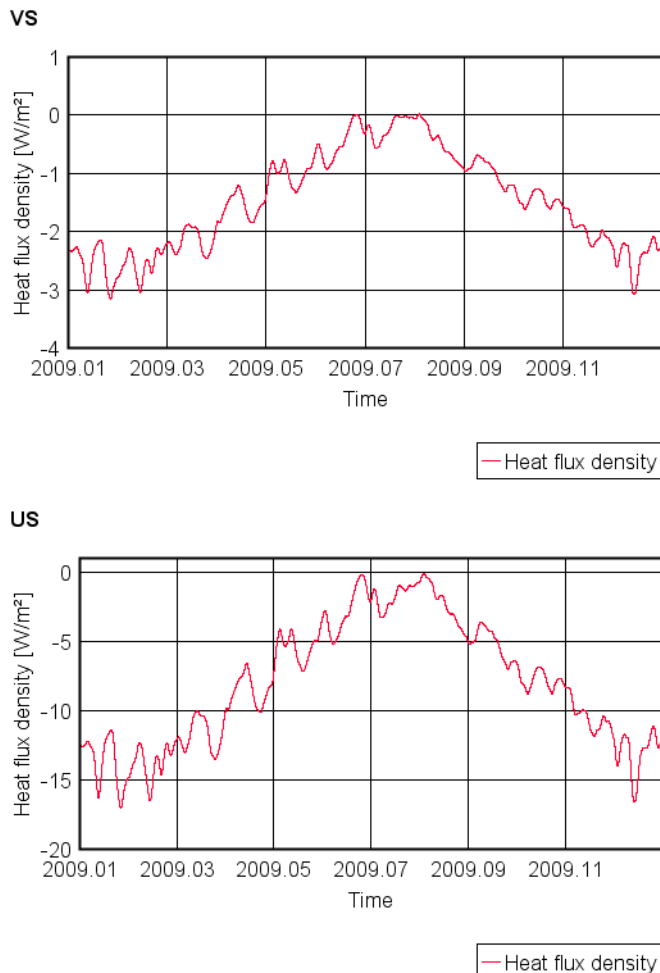


KUVA 41. Väliseinäliittymän laskentamalli, jossa EPS-eriste

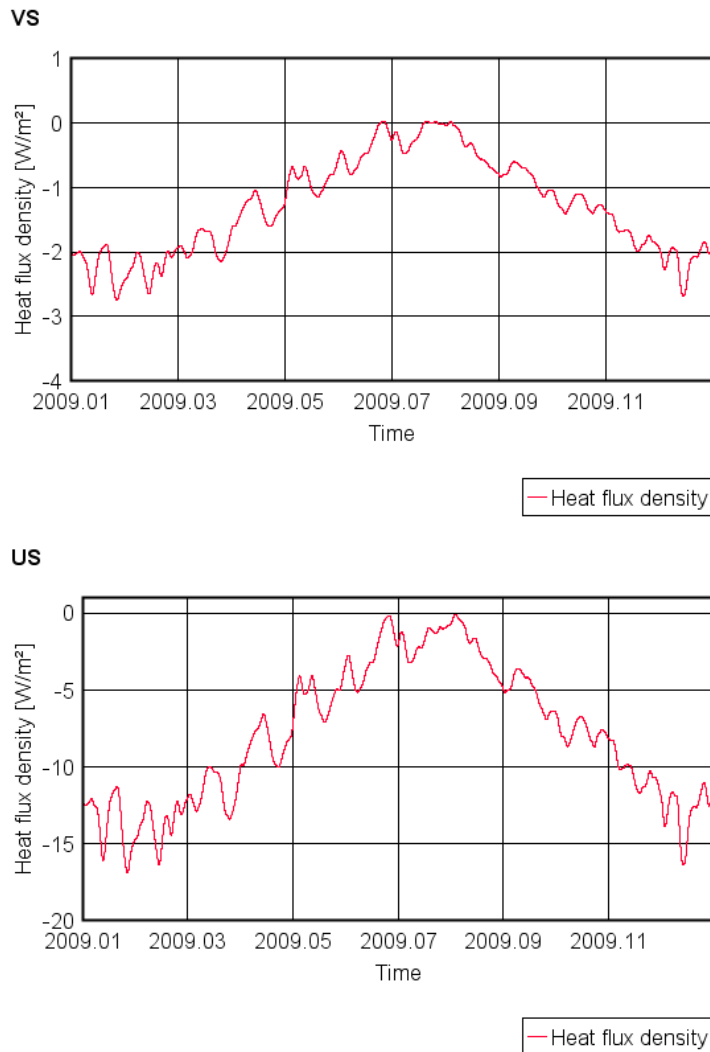
Tulosten analysointi

Väliseinän ja ulkoseinän välisessä liittymässä näkyi vastaavia eroja kuin muissa-kin simuloinneissa. Tosin erot olivat jo hieman pienempiä tällä syvyydellä. Lämpötilat pysyivät rakennuksen molemmilla puolilla melkein samoina vuoden ympäri ja suhteellinen kosteus oli koillisen puolella noin 5 prosenttia korkeampi, maksimiarvon ollessa noin 62 prosenttia, kuin lounaan puolella.

EPS-vertailu tehtiin B-talon liittymän simuloinnissa, jossa tiilen lämmönjohtavuus on hieman suurempi. Periaate liittymässä on kuitenkin sama ja näin ollen A-talossa lämpövirrat pienenisivät laskennassa samassa suhteessa. Kuvissa 42 ja 43 näkyy eristeen vaikutus liittymän lämpövirtoihin.

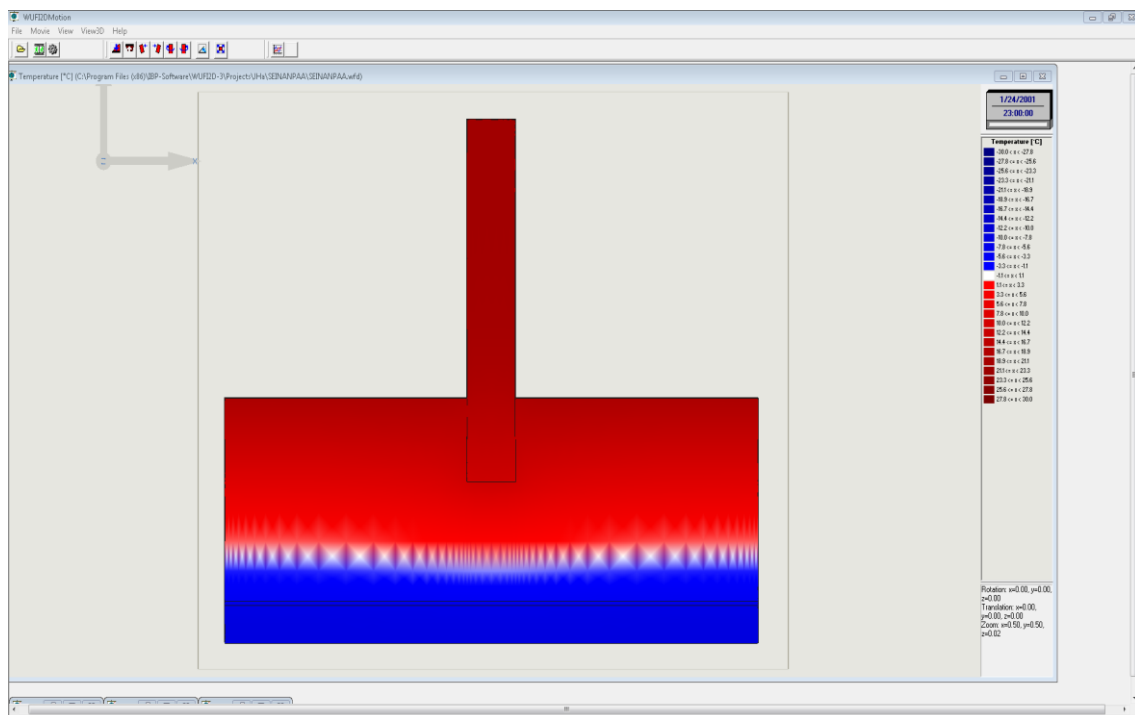


KUVA 42. Liittymän lämpövirta ilman eristettä

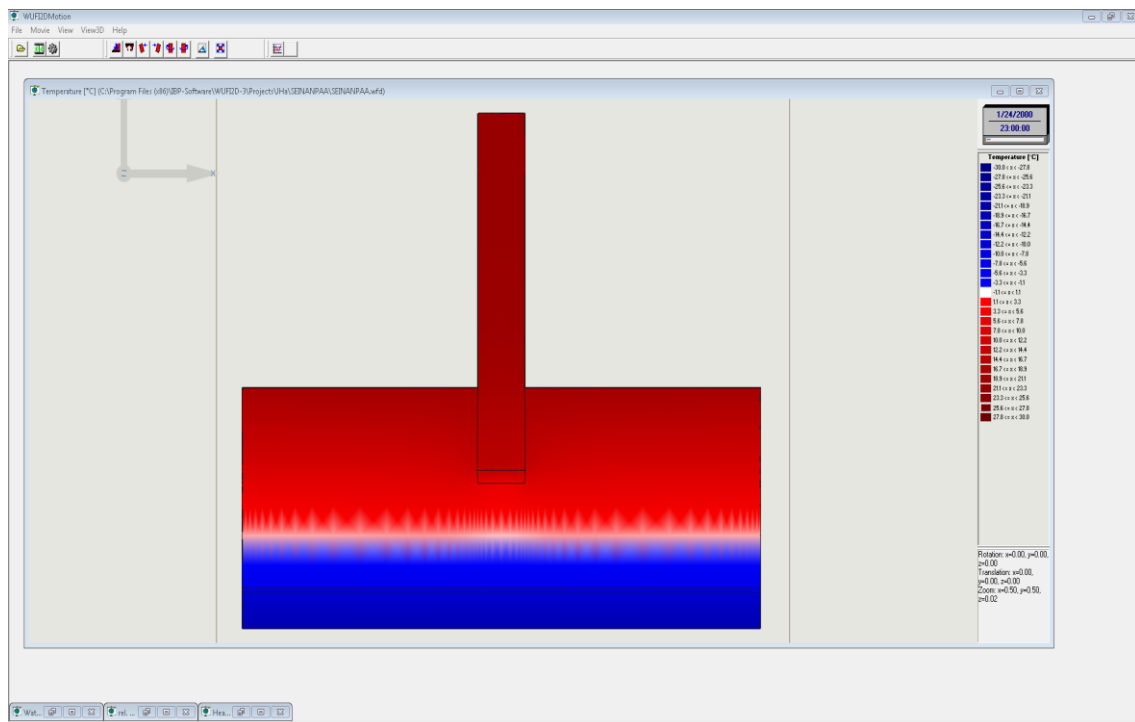


KUVA 43. Liittymän lämpövirta, kun seinän päässä on EPS-eriste

Kuten kuvista voidaan havaita, pienenee lämpövirran tiheys väliseinän pinnan läpi suhteellisen vähän kylmissä olosuhteissa. Sama ilmiö näkyy myös kuvissa 44 ja 45, joissa rakenteen lämpötilakenttä muuttuu hieman eristeen vaikutuksesta. Tiilimuurauksen paksuus näissä kohdissa riittää siis vielä eristämään rakennetta suhteellisen hyvin.



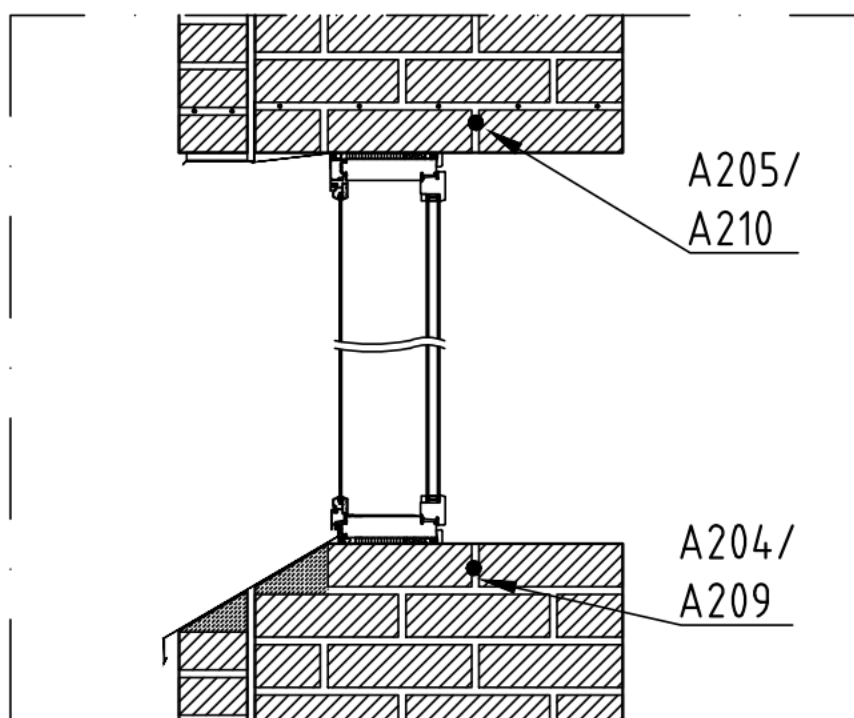
KUVA 44. Lämpötilakenttä talvella, kun seinän päässä ei ole eristettä



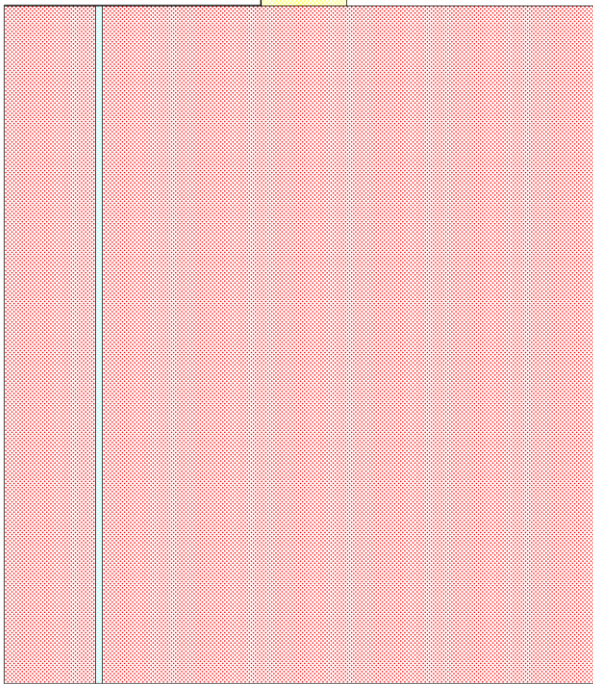
KUVA 45. Lämpötilakenttä talvella, kun seinän päässä on EPS-eriste

4.6 Ikkunaliittymä, pisteet A204/A209 ja A205/A210

Ikkunaliittymän mittauspisteet valittiin kuvan 46 mukaisella tavalla. Useasti ikkunan liittyminen ulkoseinärakenteeseen on hieman monimutkaisempi ja sisältää yleensä puuosia, jolloin ikkunaliittymässä olisi kosteuden kannalta kriittisempiä paikkoja. Tässä työssä keskityttiin ikkunaliittymän osalta tarkastelemaan pääasiassa lämpötiloja pintojen läheisyydessä ikkunapenkeillä ja lämpövirtoja. Laskennallisesti oli hyödyllistä tarkastella vain toinen reuna ikkunasta ja tarkasteltavaksi valittiin alareuna eli mittauspisteet A204 ja A209. Laskentamallina käytettiin yksinkertaistettua laskentamallia (kuva 47), jossa laskentaa varten mallinnetaan ikkunan tilalle adiabaattireunaehto ja karmivahvuutta kavennetaan ikkunatyypin mukaan.

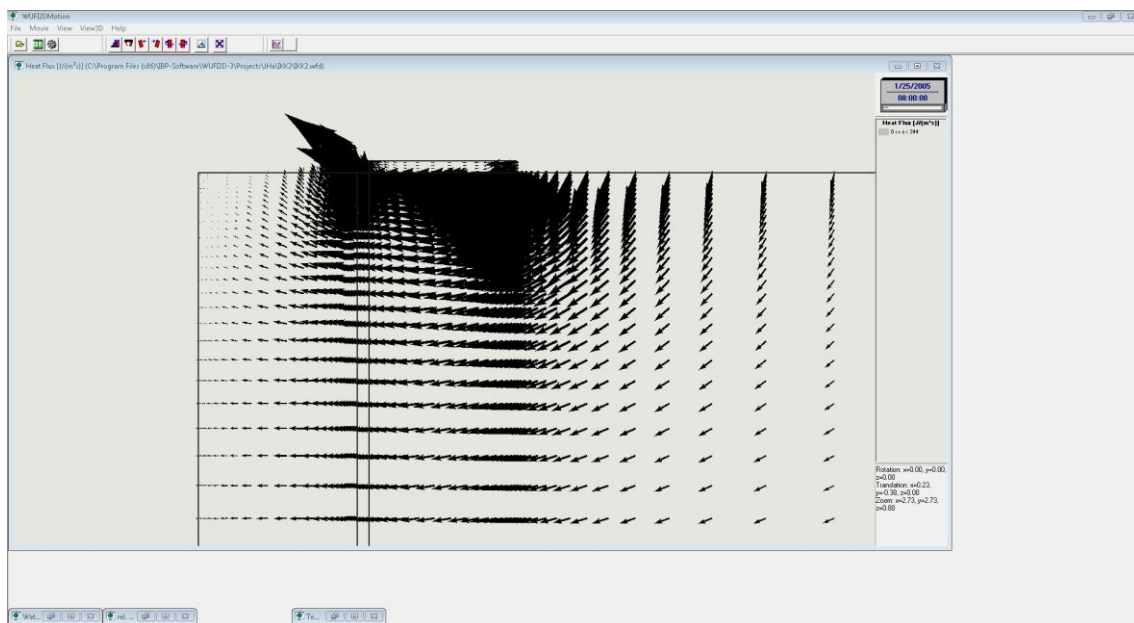


KUVA 46. Mittauspisteet ikkunaliittymässä



KUVA 47. Ikkunaliittymän yksinkertaistettu laskentamalli

Vertailulaskelmana tehtiin laskelma, jossa ikkuna sijoitettiin sisäkuoren ulkoreunaan. Lämpövirran keskittyminen ikkunakarmin läheisyyteen näkyy kuvassa 48.



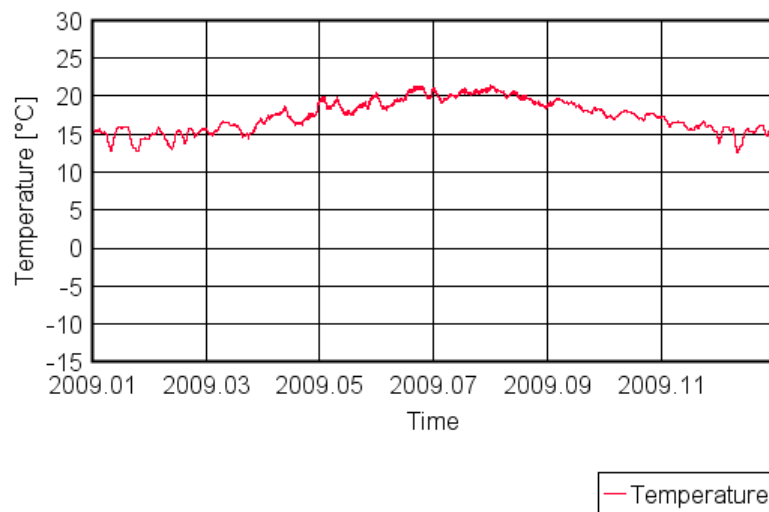
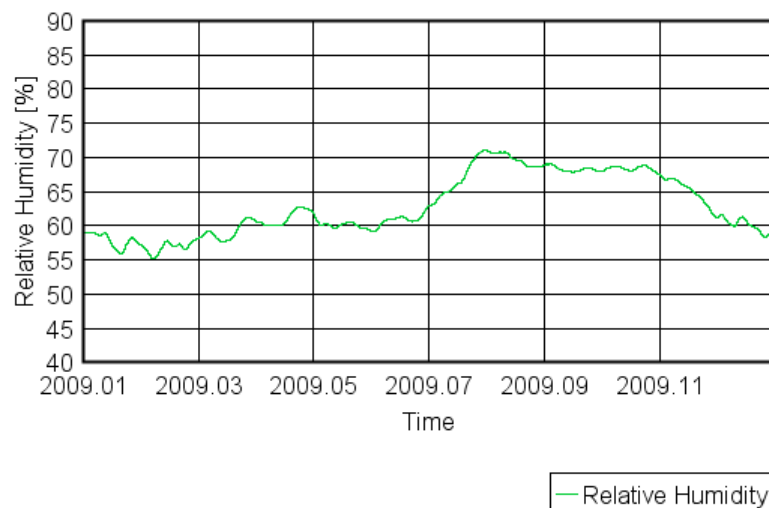
KUVA 48. Lämpövirta ikkunakarmin läheisyydessä

Molemmissa laskelmissa esiintyi ongelmia ikkunaliittymässä koillisen puolella. Laskelmien jälkeen tuloksista ilmeni, etteivät kosteuspitoisuudet voineet pitää paikkaansa pisteessä A209. Tämä johtui luultavasti siitä, että tiilen viereen määritetyn ikkunapellityksen ominaisuudet poikkesivat merkittävästi tiilestä. Suurempi sademäärä ja poikkeama rajapinnassa aiheuttivat todennäköisesti liikaa virheitä laskentaan. Asiaa yritettiin korjata siinä kuitenkaan onnistumatta kohtuudella ja koska keskityttiin enemmän lämpötekniisiin asioihin, päätettiin ikkunaliittymän käyttäytymistä arvioida pisteen A204 mukaan.

Tulosten analysointi

Pisteen A204 lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot vuoden ajalta on esitetty kuvassa 49. Tuloksista nähdään lämpötilan olevan pinnan lähellä kylmimmillään noin 13 celsiusastetta, kun ikkuna on suunnitellulla paikalla. Tuloksista myös havaittiin, ettei ikkunan siirrolla ulommas ollut merkittävästi vaikutusta lämpötiloihin pinnan lähellä.

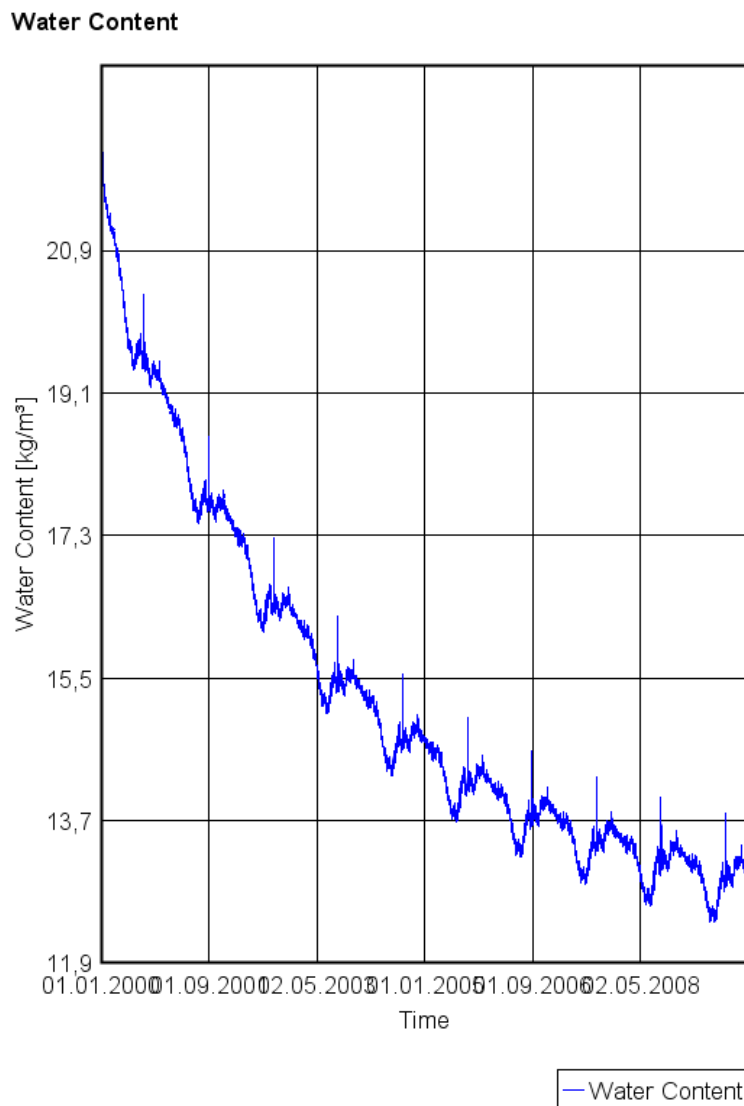
Tuloksien tulkinnassa tulee jälleen huomioida, että sisäpinnoille määritetyt olosuhteet pitävät pinnan lämpötilat vakioina niin seinän kuin ikkunapenkinkin osalta. Lisäksi laskenta ei voi myöskään annetuilla ehdoilla huomioida ikkunan läpi tulevaa säteilyä ikkunapenkille, jonka luotettava simulointi olisi muutenkin erittäin hankalaa, ellei jopa mahdotonta kyseisellä ohjelmistolla.

A204**Relative Humidity****KUVA 49. Piste A204 lämpötilat ja suhteelliset kosteudet käyttötilassa**

Lämpövirtoihin ikkunan siirto rakenteessa vaikutti kuitenkin jonkin verran enemmän. Lämpövirran tiheydet rakenneosien pintojen läpi on esitetty liitteessä 3. Tuloksista havaittiin, että eniten eroa lämpövirroissa esiintyi oletetusti kylmissä olosuhteissa ja nähtävästi myös seinän pystypinnalla. Pienen maksimi lämpövirran tiheys kasvoi sijoitettaessa ikkuna keskelle noin arvoon $20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, kun se ulko-reunaan sijoitettuna jäi noin arvoon $16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Vastaavasti seinän pystypinnalla arvot olivat noin $10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja $14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

4.7 Kuivumistarkastelut

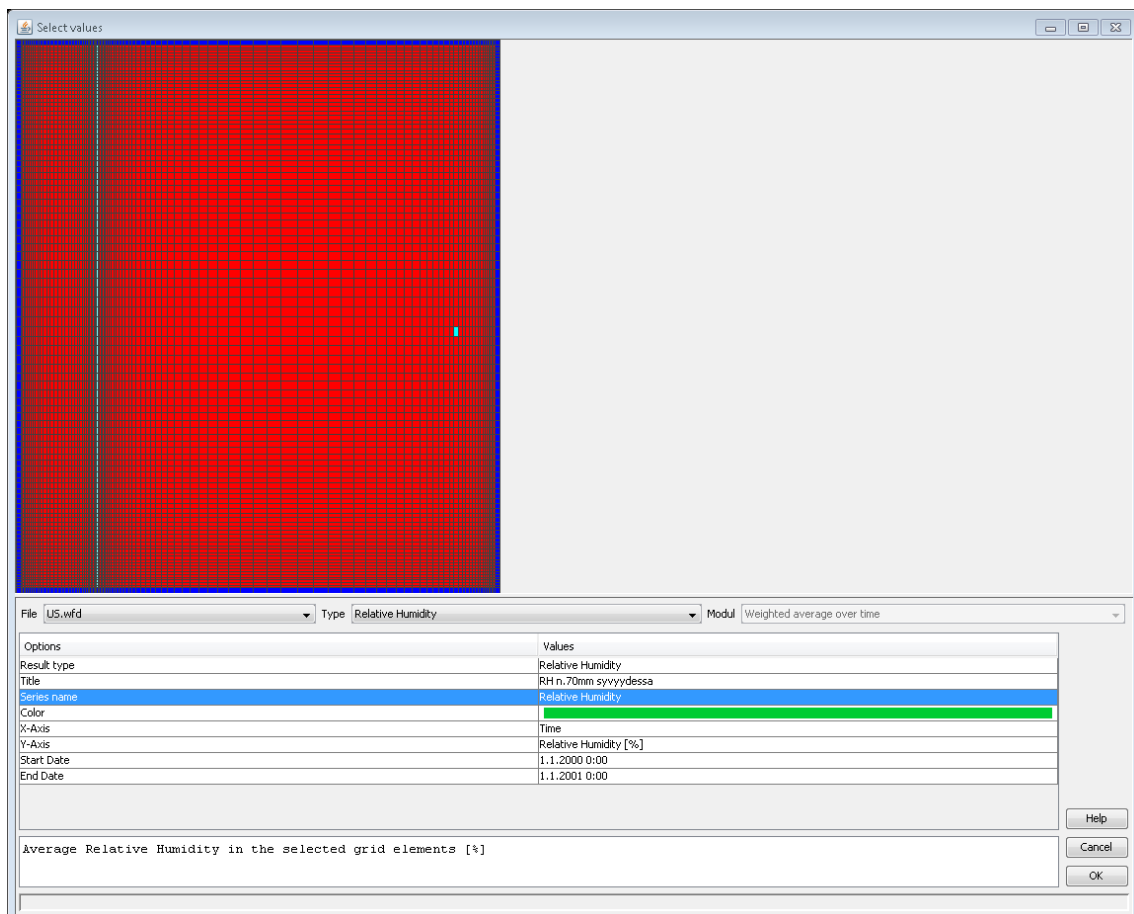
Rakenteita simuloitaessa huomattiin, että rakenteiden asettuminen tasapainokosteuteen ympäristön kanssa vaati ohjelman oletusarvoilla noin 10 vuoden las-kenta-ajan. Tästä voidaan päätellä massiivisen muurauksen olevan hidas kuivu-maan. Kuvasta 50 nähdään esimerkiksi ulkoseinän ja kantavan väliseinän las-kentamallissa tapahtuva kokonaiskosteusmäärän asettuminen 10 vuoden las-kenta-ajalla, kun laskennan alkuolosuhteina on käytetty tiilimuurauksissa suhteel-lista kosteutta 80 prosenttia ja betonilla suhteellista kosteutta 85 prosenttia. Il-masto-olosuhteet vastasivat rakennuksen normaalia käyttöä.



KUVA 50. US-VS-liittymän kokonaiskosteusmäärä 10 vuoden aikana

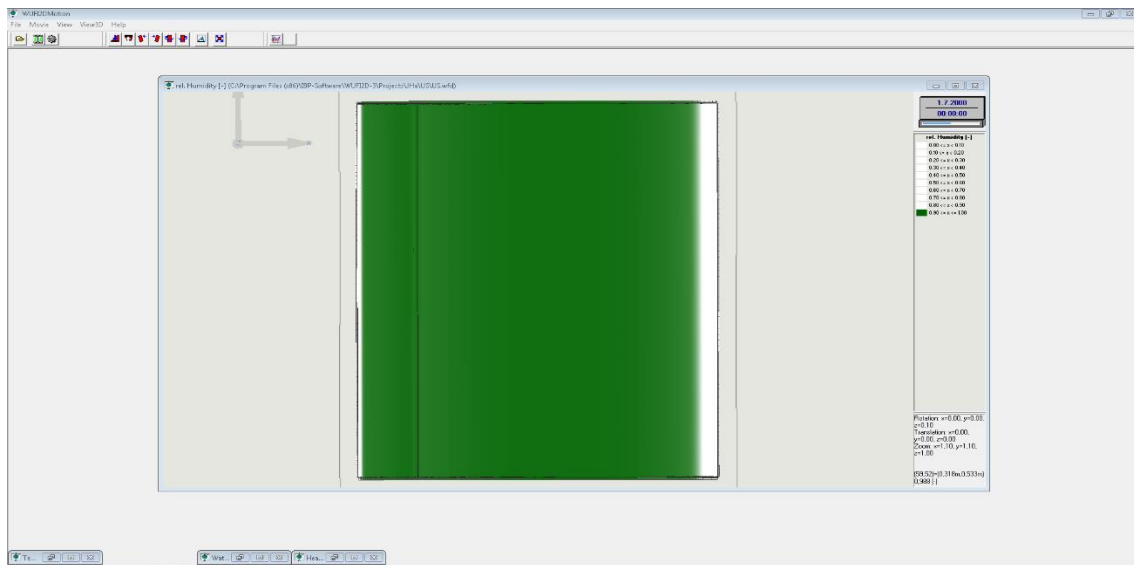
Kuivattamistarkasteluihin valittiin pelkkä ulkoseinärakenne ja varmuuden lisäämiseksi ulkopinta suunnattiin koilliseen. Tarkastelut tehtiin metrin korkuisella mallilla olosuhteiden kannalta neljässä eri tilanteessa, joissa jokaisessa suhteellisen kosteuden oletettiin olevan 50 prosenttia ja lämpötilaa muutettiin portaittain. Lämpötilat olivat 20, 25, 30 ja 40 celsiusastetta.

Laskenta aloitettiin tammikuussa ja sitä jatkettiin yksi vuosi. Lähtökosteudeksi arvioitiin tiilimuuraukselle tuotantovaiheen kosteus 80 kg/m^3 , joka on suhteellisena kosteutena noin 99 prosenttia. Tarkastelupisteeksi valittiin piste keskeltä mallia, joka sijaitsi noin 70 millimetrin syvyydessä sisäpinnasta mitattuna. Kriteerinä pidettiin sitä, että suhteellinen kosteus tässä pisteessä on 90 prosenttia, joka on monen rakennusmateriaalin pinnoituskosteus. Tarkastelupiste on esitetty kuvassa 51.

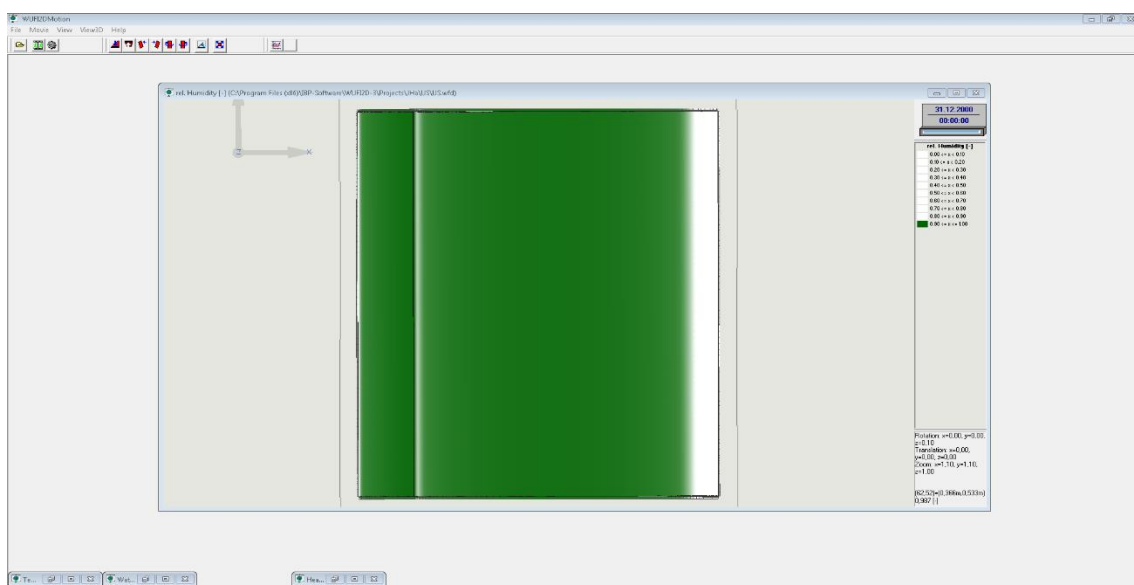


KUVA 51. Tarkastelupiste sisäkuoressa

Laskentatulokset osoittivat, että tarkastelupisteen saavuttaminen suhteellisen kosteuden arvon 90 prosenttia vaati olosuhteista riippuen aikaa puolesta vuodesta reiluun vuoteen. Nopeimmin piste saavutettiin, kun sisälämpötila oli 40 celsiusastetta. Lämpötilan ollessa 20 celsiusastetta, ei laskenta-aika aivan riittänyt. Kuvissa 52 ja 53 on esitetty suhteellisen kosteuden jakautuminen rakenteessa kuuden ja kahdentoista kuukauden jälkeen, kun kuivuminen on tapahtunut 20 celsiusasteen lämpötilassa. Vihreänä näkyvät alueet kuvaavat yli 90 prosentin suhteellista kosteutta.



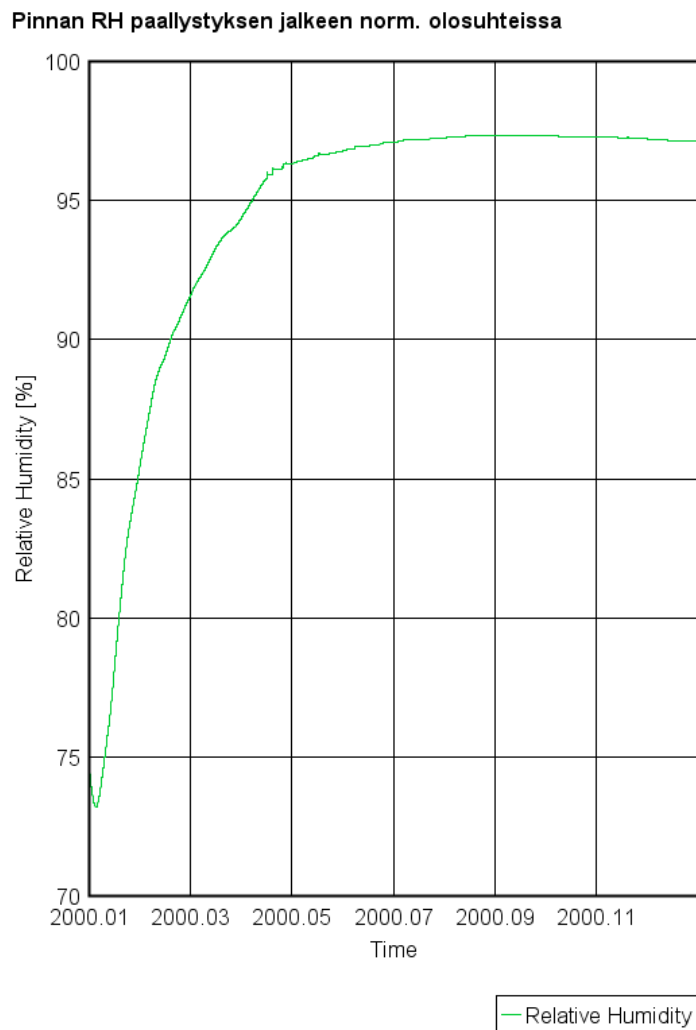
KUVA 52. Seinärakenteen suhteellinen kosteus kuuden kuukauden jälkeen



KUVA 53. Seinärakenteen suhteellinen kosteus kahdentoista kuukauden jälkeen

Tarkastelupisteen suhteellisen kosteuden laskentatulokset eri olosuhteissa on esitetty liitteessä 4.

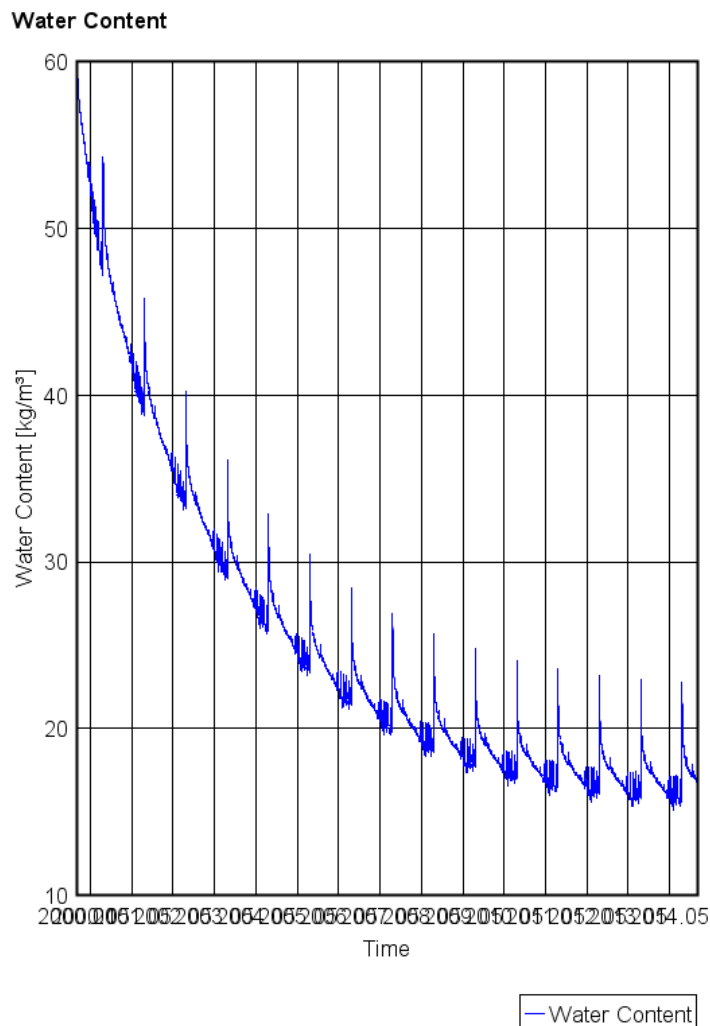
Sillä oletuksella, että suhteellinen kosteus esimerkiksi pesuhuoneen seinässä tarkastelusyvyydellä olisi saatu 90 prosenttiin, tehtiin suuntaa antava simulointi rakenteen sisäpintaan tasoittuvasta kosteudesta, kun pintaan asennetaan tässä vaiheessa vedeneriste. Tarkastelua varten tuloksista mitattiin keskimääräinen suhteellinen kosteus sisäkuoressa tarkastelupisteen ulkopuolella sekä sisäpuolella. Simulointimalliin tehtiin 70 millimetrin vahvuinen kerros sisäpinnan puolelle ja tälle alueelle annettiin keskimääräinen suhteellinen kosteus 75 prosenttia. Loppuosalle seinästä annettiin suhteellinen kosteus 98,8 prosenttia. Kuvasta 54 nähdään laskennan tulos.



KUVA 54. Suhteellinen kosteus pinnoitteen alla, kun pinta vedeneristetään

Tuloksesta voidaan havaita, että suhteellinen kosteus nousee pinnan lähellä normaaliolosuhteissa melko nopeasti pinnoittamisen jälkeen noin arvoon 97 prosenttia. Tämän perusteella voidaan arvioida, että rakenne tulisi todennäköisesti saada syvemmältä kuivaksi, jos suhteellisen kosteuden täytyy pysyä pintarakenteissa alhaisempana.

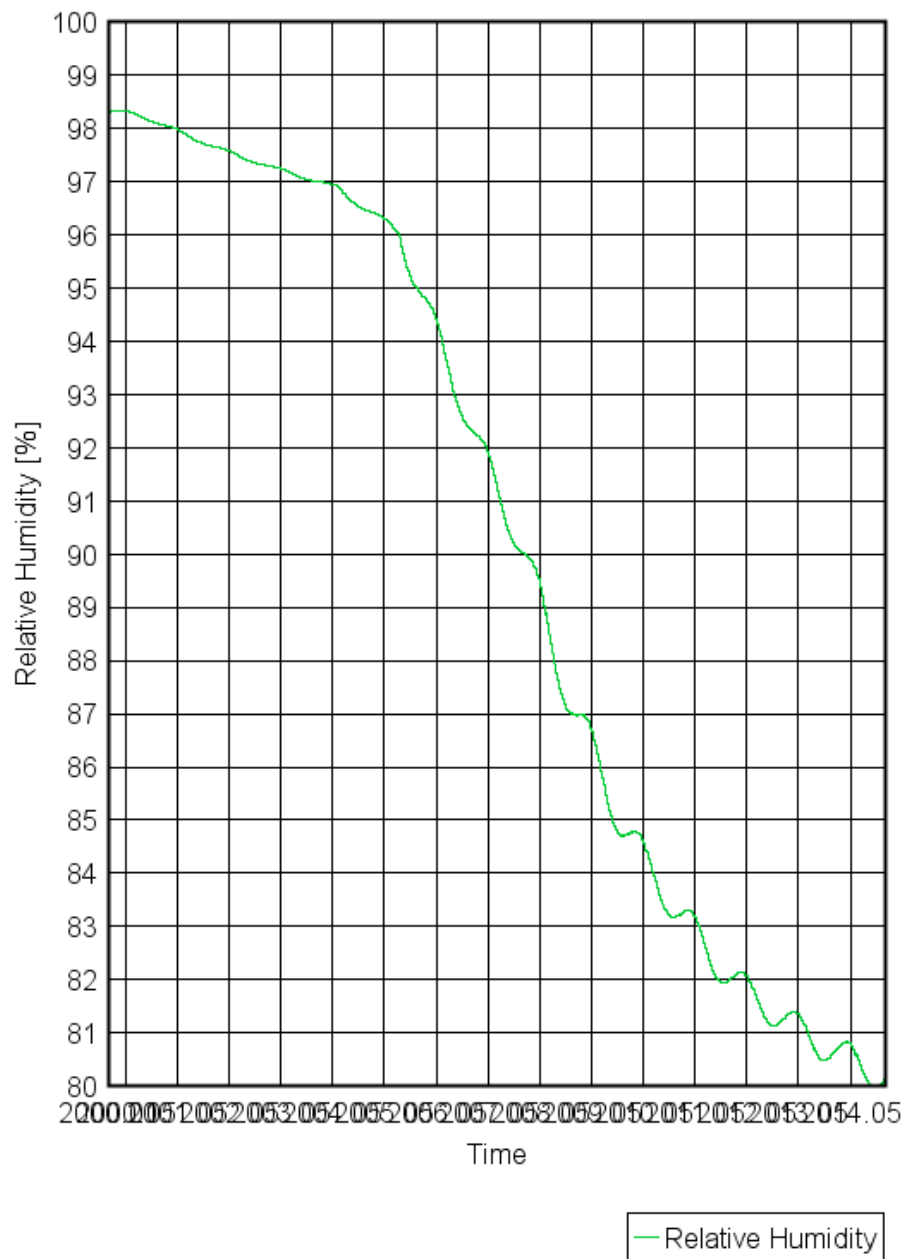
Näiden lisäksi arvioitiin vielä tilannetta, jossa seinärakenteesta olisi saatu poistumaan 20 kg/m^3 vettä, jolloin seinän keskimääräinen suhteellinen kosteus olisi noin 98 prosenttia. Tämän jälkeen rakenteen annettaisiin kuivua normaaliolosuhteissa. Kokonaiskosteuspitoisuuden muutos 15 vuoden aikana näkyy kuvassa 55.



KUVA 55. Kokonaiskosteusmäärä seinärakenteessa 15 vuoden aikana

Kuvassa 56 on esitetty vielä suhteellinen kosteus sisäkuoren keskellä vastavissa olosuhteissa. Kuvassa vaaka-akselilla näkyy aika vuoden välein. Kuvasta nähdään, että suhteellisen kosteuden lasku on hidasta kapillaarisella alueella, jonka jälkeen se muuttuu suhteessa aiempaan merkittävästi.

RH sisäkuoren keskellä

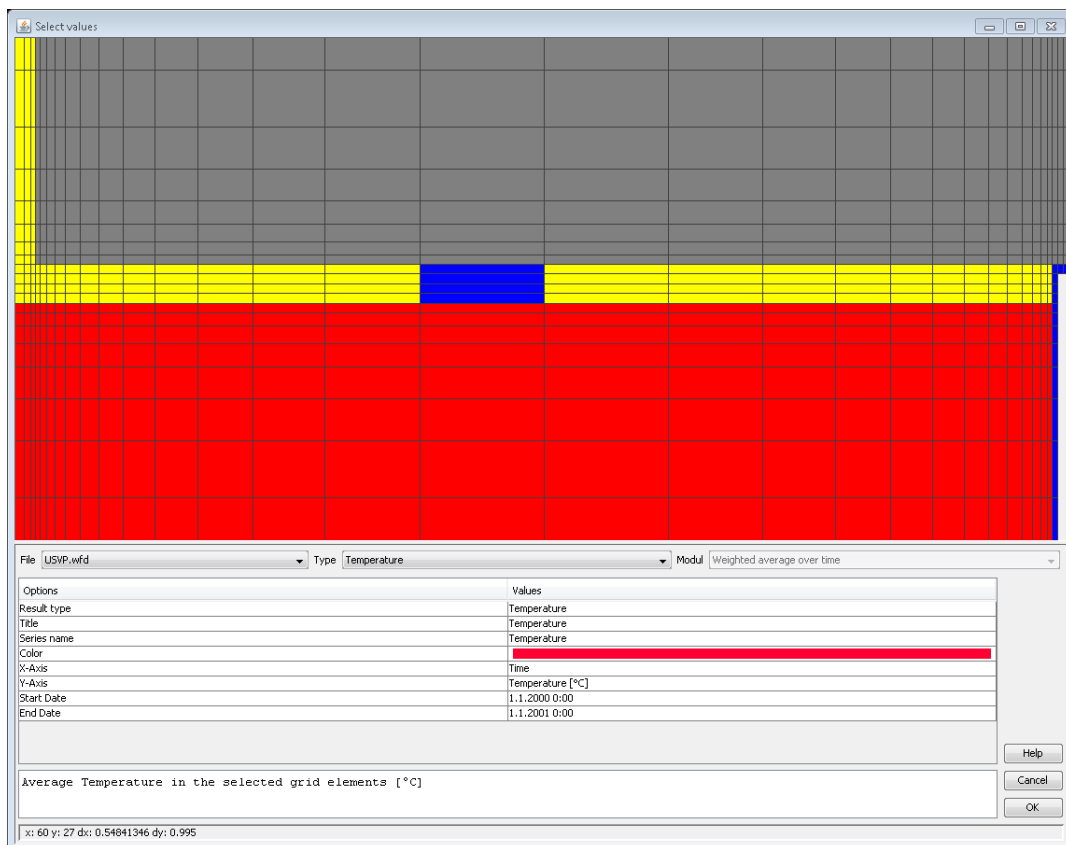


KUVA 56. Suhteellisen kosteuden muutos kapillaarialueen (RH 97) jälkeen

4.8 Homehtumistarkastelu suurilla rakennekosteuksilla

Tiilimuurauksen ja paikallavalurakenteiden rakennusvaiheen suurten kosteuspi-toisuuksien vuoksi kosteuden vaikutuksia haluttiin vielä arvioida hieman teke-mällä simulointi välipohjaliittymälle, jossa on mukana sekä tiilimuuraus että be-toni. Tarkastelut tehtiin olettamalla, että tiilimuurauksen yläreunan ja välipohjan väliin jäävä ”elämisvara” täytetään tilkevillä muurauksen jälkeen. Laskennan tarkoitus oli arvioida, mikä tulisi olla liittyvien rakenteiden suhteellinen kosteus, jotta villaan ei pääsisi muodostumaan niiden johdosta homekasvustoa.

Tulokseen päästiin neljän laskennan jälkeen, joista viimeisessä oli sekä betonin että tiilimuurauksen suhteellinen kosteus 85 prosenttia. Tällöin homeindeksin arvo jäi vuoden laskennassa taantuma huomioiden arvoon 0,2 ja ilman taantu-maa arvoon 1. Tarkastelupiste mallissa on esitetty kuvassa 57 ja homeindeksit laskentatapauksittain liitteessä 5.



KUVA 57. Tilkevillan tarkastelupiste simulointimallissa

4.9 Simulointituloksien yhteenveto

Tuloksien perusteella rakenteet ovat sekä lämpö- että kosteusteknisesti toimivia rakennuksen käyttötilassa. Rakenteiden kuivuminen käyttötilaan on massiivisuudesta johtuen kuitenkin laskennan perusteella hidasta, mikä kannattaa ottaa huomioon rakennusvaiheessa muun muassa materiaalien suojauksessa sekä pinnoituksessa.

Rakenteen ilmansuunta vaikutti laskelmissa jonkin verran tuloksiin. Rakenteiden lämpökäyttäytyminen oli suunnilleen samanlaista rakennuksen molemmilla sivuilla, joskin lounaan puolella lämpötilat pysyivät hieman korkeampina johtuen voimakkaammasta auringonpaisteesta. Kosteuskäyttäytymisessä eroa näkyi hieman enemmän. Suhteelliset kosteudet pysyivät korkeammalla koillisen puolella, jossa auringon lämmittävä vaikutus oli pienempi. Kriittisille kohdille tehtyjen home tarkastelujen perusteella tämä ei kuitenkaan muodostunut ongelmaksi rakenteissa.

Rakennekosteuden poistuminen muurauksista ja betonivaluista näytti simulointien perusteella tapahtuvan hitaasti. Esimerkiksi ulkoseinän ja väliseinän liittymän simulointimalli vaati rakennuksen normaaleissa käyttö-olosuhteissa noin kymmenen vuoden laskenta-ajan saavuttaakseen tasapainokosteuden ympäristön kanssa, kun suhteelliset kosteudet olivat laskennan alussa tiiliseinällä 80 prosenttia ja välipohjalaatalla 85 prosenttia. Homehtumistarkastelu välipohjaliittymässä osoitti, että betonin ja tiilimuurauksen suhteellisten kosteuksien olisi suotuisaa olla korkeintaan 85 prosenttia, kun liittymään asennetaan tilkevilla.

Ulkoseinärakenteelle tehdyssä kuivumistarkastelussa, jossa tarkastelupiste sijoitettiin 70 millimetrin päähän sisäpinnasta ja kriteerinä pidettiin tämän pisteen saavuttamista suhteellisen kosteuden arvon 90 prosenttia, vaati simulointi olosuhteista riippuen aikaa puolesta vuodesta reiluun vuoteen. Laskenta myös osoitti, ettei tämä riittänyt pitämään suhteellista kosteutta rakenteen pinnassa alle 90 prosentissa, mikäli pintaan asennetaan tässä vaiheessa tiivis kerros.

5 LOPPUSANAT

Tässä työssä oli tarkoitus saada tietoa massiivirakenteisen tiiliseinän lämpö- ja kosteuskäyttäytymisestä koerakennuskohteessa. Kohteessa käytettyä ulkoseinärakennetta ei ole Suomessa käytetty yleisesti vuosikymmeniin. Lisäksi työssä tarkasteltiin massiivisten rakenteiden kuivumista.

Työ tehtiin käyttämällä numeerista laskentaa, joka suoritettiin WUFI 2D -ohjelmistolla. Laskentaohjelman ansiosta laskenta pystyttiin tekemään tarkemmin kuin perinteisesti stationäärisesti käsin laskennalla. Tietokoneavusteinen laskenta mahdollisti rakenteiden laskennan epästationäärisesti eli ajasta riippuvassa tilassa, jossa muuttuvina parametreina olivat niin ilmasto-olosuhteet kuin rakennusmateriaalien materiaaliominaisuudet.

Simulointien tuloksina saatiin haluttua tietoa rakenteen lämpö- ja kosteuskäyttäytymisestä muuttuvissa olosuhteissa. Tiedon avulla voitiin etukäteen varmentaa rakenteen toimivuutta normaaleissa olosuhteissa sekä saatiin käsitystä rakenteiden vaatimasta kuivaustarpeesta. Tulosten perusteella voidaan myös rakennusvaiheessa pyrkiä tekemään tarpeellisia toimenpiteitä, jotta vältetään kosteuden mahdollisesti aiheuttamilta ongelmilta.

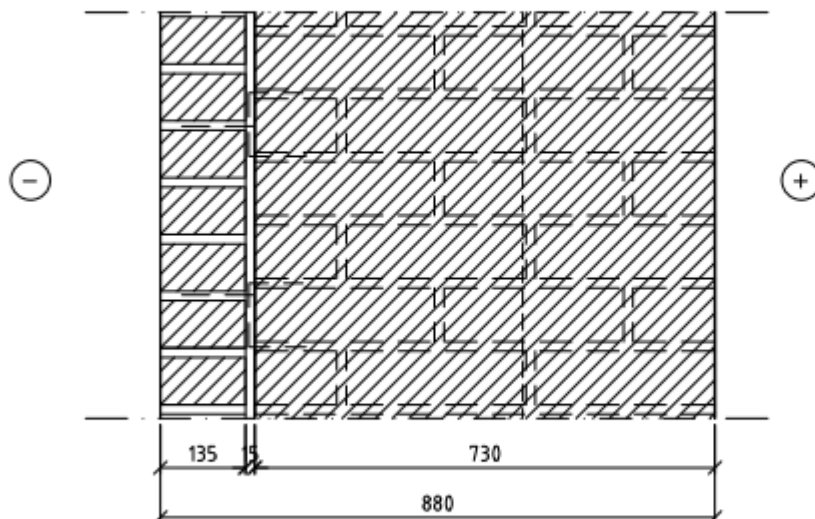
Vaikka laskentaohjelma mahdollistaa hyvin tarkan rakenteiden simuloinnin, liittyy siihen kuitenkin myös käyttäjän suuri vastuu sekä parametrien määrittämisessä sekä tuloksien tulkinnassa. Laskentatapausten määrittämiseen tarvittavaa tarkkaa tietoa voi olla niukasti saatavilla ja tulosten tulkinta vaatii käyttäjältä perehtyneisyyttä rakennusfysiikkaan. Pelkkä laskentaohjelman käytön hallinta ei siis riitä takaamaan luotettavien tulosten saamista.

LÄHTEET

1. Siikanen, Unto 2014. Rakennusfysiikka: Perusteet ja sovelluksia. Helsinki: Rakennustieto Oy.
2. Björkholtz, Dick 1997. Lämpö ja kosteus: Rakennusfysiikka. Helsinki: Rakennustieto Oy.
3. RIL 107-2012. 2012. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.
4. Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille: Wufi 3.3-Pro käyttöohje ja esimerkkilaskelmat. 2004. Rafnet-ryhmä. Saatavissa: <https://moodle.oamk.fi/course/view.php?id=3289#section-3>. Hakupäivä 15.3.2018
5. 2D:Dialog Geometry. 2008. Fraunhofer IBP. Saatavissa: https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/2D:Dialog_Geometry. Hakupäivä 2.4.2018.
6. 2D:Dialog Grid. 2008. Fraunhofer IBP. Saatavissa: https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/2D:Dialog_Grid. Hakupäivä 2.4.2018.
7. Vinha, Juha - Valovirta, Ilkka - Korpi, Minna - Mikkilä, Antti - Käkelä, Pasi 2005. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tampere. Saatavissa: https://tutcris.tut.fi/portal/files/1013606/vinha_rakennusmateriaalien_rakennusfysikaaliset_ominaisuudet.pdf. Hakupäivä 2.4.2018.
8. 2D:Dialog MaterialDatabase. 2008. Fraunhofer IBP. Saatavissa: https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/2D:Dialog_MaterialDatabase. Hakupäivä 2.4.2018.
9. 2D:Dialog InitialConditions. 2008. Fraunhofer IBP. Saatavissa: https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/2D:Dialog_InitialConditions. Hakupäivä 2.4.2018.

- 10.Details:Surface. 2008. Fraunhofer IBP. Saatavissa: <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:Surface>. Hakupäivä 2.4.2018.
- 11.Details:Climate. 2008. Fraunhofer IBP. Saatavissa: <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:Climate>. Hakupäivä 2.4.2018.
- 12.1D:Dialog HygrothermalSources. 2008. Fraunhofer IBP. Saatavissa: https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/1D:Dialog_Hygrothermal_Sources. Hakupäivä 2.4.2018.
- 13.2D:Dialog Computational Parameters. 2008. Fraunhofer IBP. Saatavissa: https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/2D:Dialog_ComputationalParameters. Hakupäivä 2.4.2018.
- 14.Suomalainen homemalli. 2017. TTY. Saatavissa: <http://www.tut.fi/fi/tutkimus/tutkimusalat/rakennustekniikka/rakennetekniikka/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/index.htm>. Hakupäivä 3.4.2018.
- 15.RT 05-10710. 1999. Kosteus rakennuksissa. Rakennustieto Oy.
- 16.Vinha, Juha - Laukkarinen, Anssi - Mäkitalo, Mikael - Nurmi, Sakari - Huttunen, Petteri - Pakkanen, Paavo - Kero, Paavo - Manelius, Elina - Lahdensivu, Jukka - Köliö, Arto - Lähdesmäki, Kimmo - Piironen, Jarkko - Kuhno, Vesa - Pirinen, Matti - Aaltonen, Anu - Suonketo, Jommi - Jokisalo, Juha - Teriö, Olli - Kosken-vesa, Anssi - Palolahti, Tuomas 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampere. Saatavissa: https://tutcris.tut.fi/portal/files/956015/vinha_ilmastonmuutoksen_ja_lammoneristyksen_lisayksen_vaikutukset.pdf. Hakupäivä 3.4.2018.

US1

EI-KANTAVA ULKOSEINÄ
TALO A

PINTA TYÖSELOSTUKSEN MUKAAN

- 135 mm TIILIVERHOUS, ARK. MUKAAN, SAUMAUUS MUURAUKSEN YHTEYDESSÄ. TIILIEN JA SAUMOJEN ON OLTAVA PAKKASENKESTÄVIÄ. MUURAUSSITEET $\phi 4$, SS2333, 4 kpl/m² JA AUKKOJEN PIELISSÄ k300
- 15 mm ILMARAKO

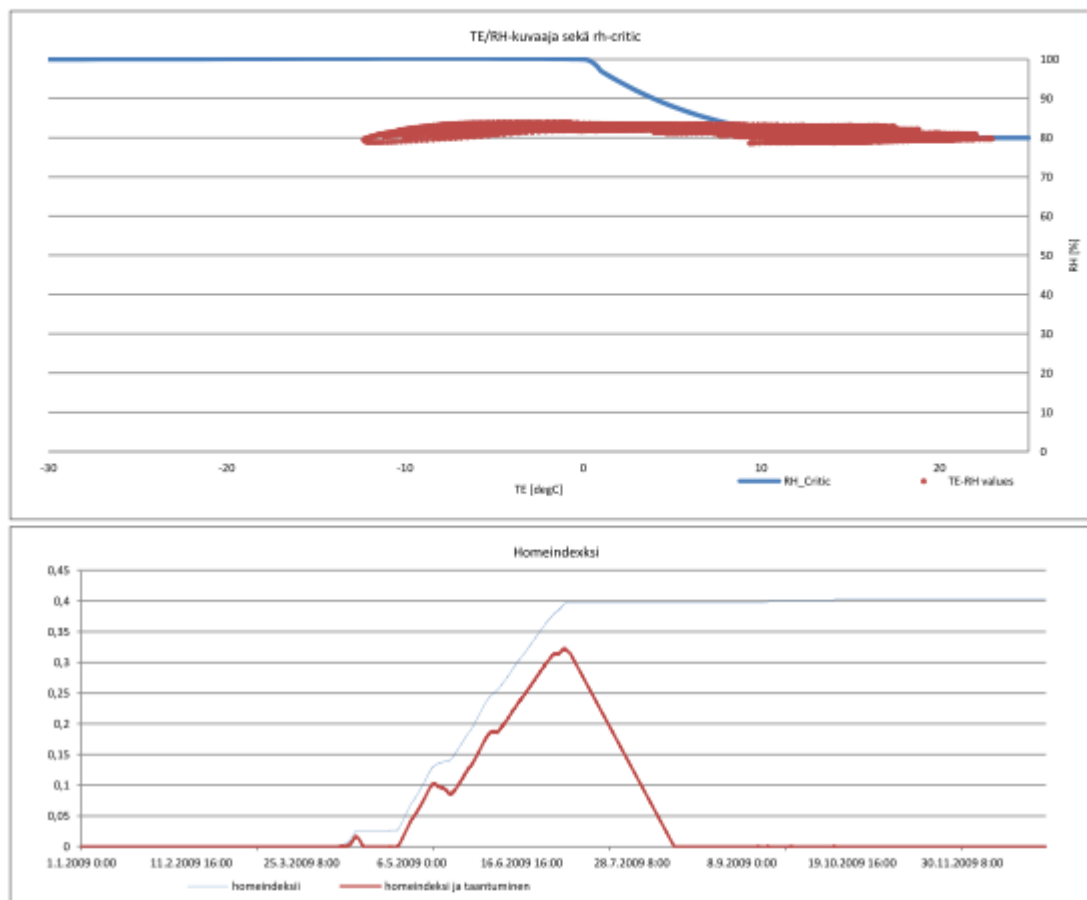
- n. 730 mm TIILIMUURAUUS
POLTETTU SAVIREIKÄTIILI 130×285×85, PAKKASENKESTÄVÄ
($\lambda_{d,tiili}$ =0.34 W/mK)

PINTA HUONESELOSTUKSEN MUKAAN

U-arvo=0.44 W/m²K ($\lambda_{d,tiilimuuraus}$ =0.42 W/mK)
($\lambda_{d,tiili}$ =0.34 W/mK)

ILMAÄÄNENERISTÄVYYS ≥ 55 dB

PALOLUOKKA REI60

**Lämpötila/kosteus pisteiden sijainti**

kriittisellä alueella	Prosentti osuus
piste alueella	17,3 %
piste alueen ulkopuolella	82,7 %

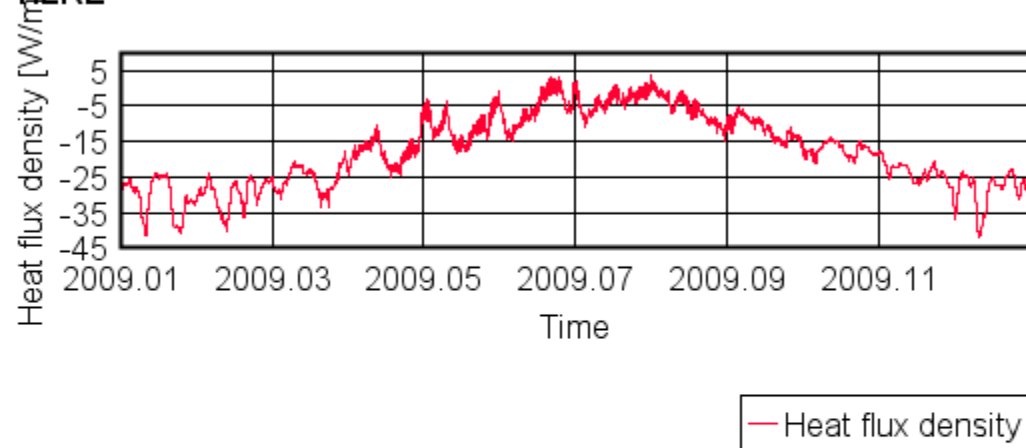
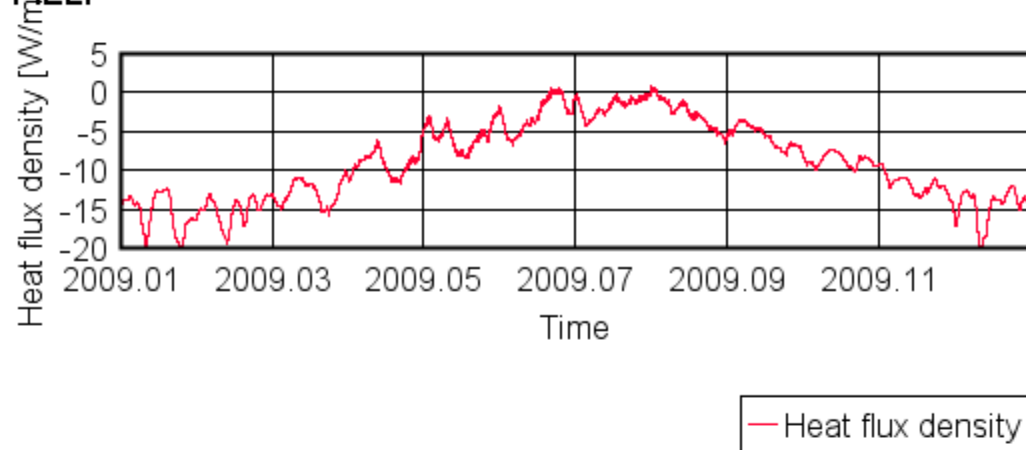
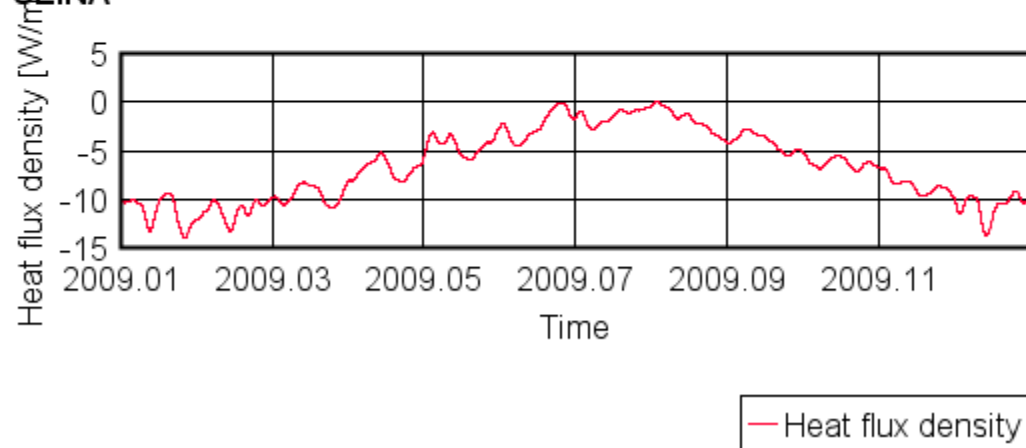
Kriittisen suhteellisen kosteuden 4 pisintä jaksoa

Jakson alkuaika	Kesto	Homeindeksi
1 7.6.2009 9:00	21 vrk, 21 h	0,1
2 30.4.2009 18:00	13 vrk, 10 h	0,1
3 28.5.2009 7:00	7 vrk, 22 h	0,1
4 21.5.2009 10:00	6 vrk, 20 h	0,0

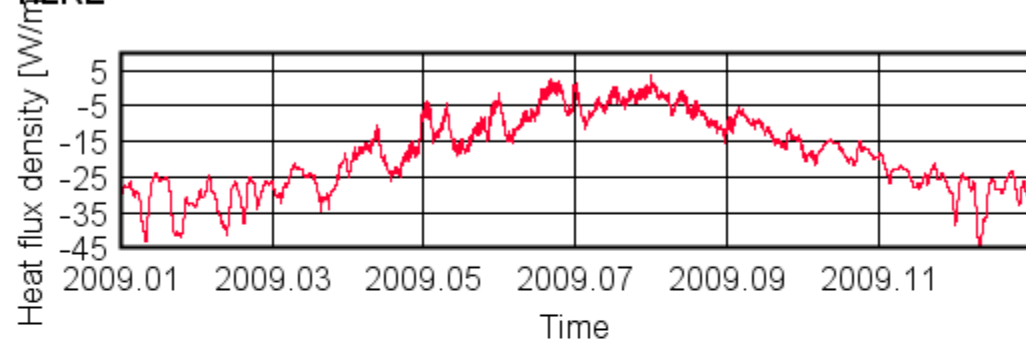
Homeindeksi

	Homeindeksi
Homeindeksin nousu yhteensä	0,4
Homeindeksi taantuminen huomioituna	0,0

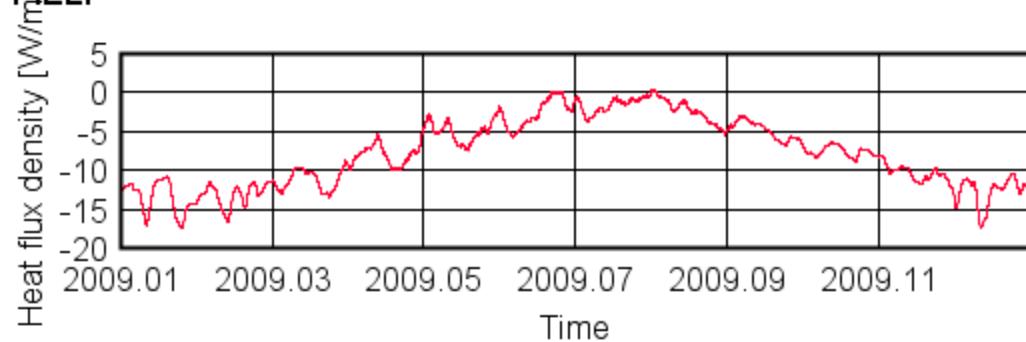
Ei kasvua, pinta puhdas

IKKUNAN KILKE**IKKUNAN RIELE****IKKUNAN SEINA**

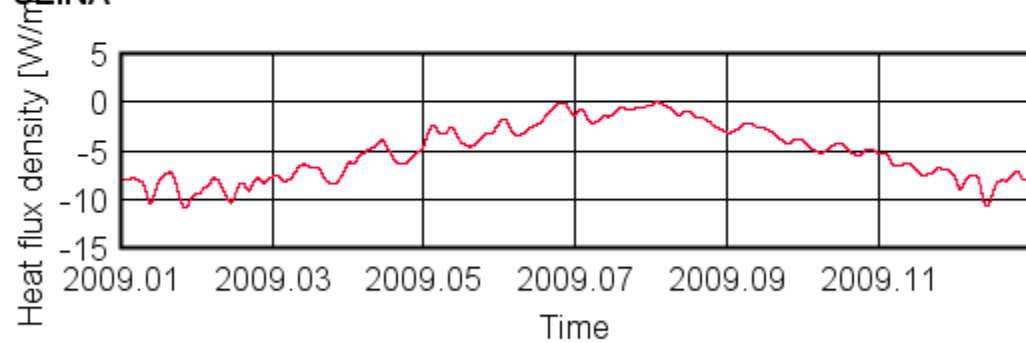
Lämpövirrat rakenteen pintojen läpi ikkunan sijaitessa keskellä seinää.

KILKE

— Heat flux density

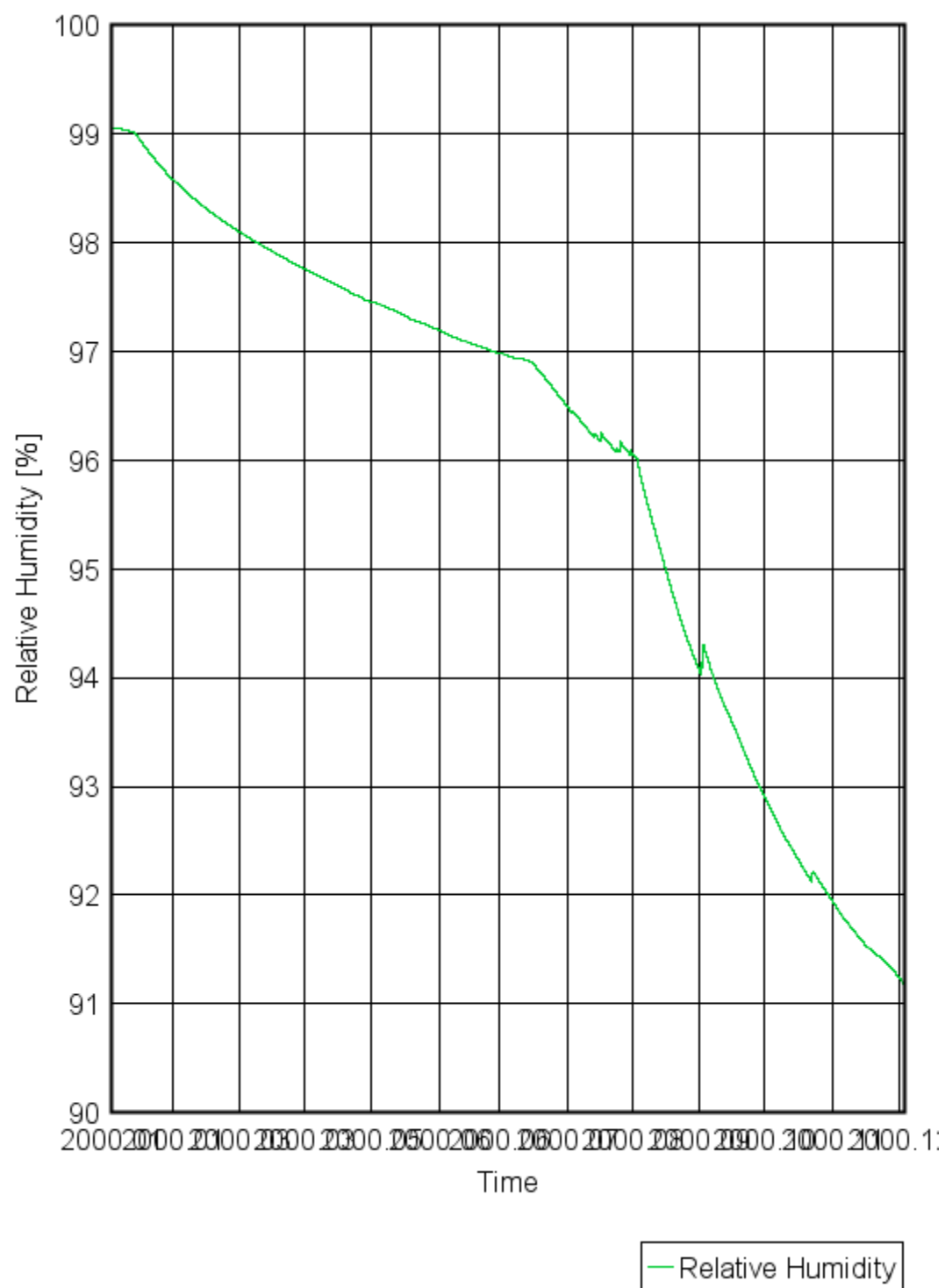
KIELI

— Heat flux density

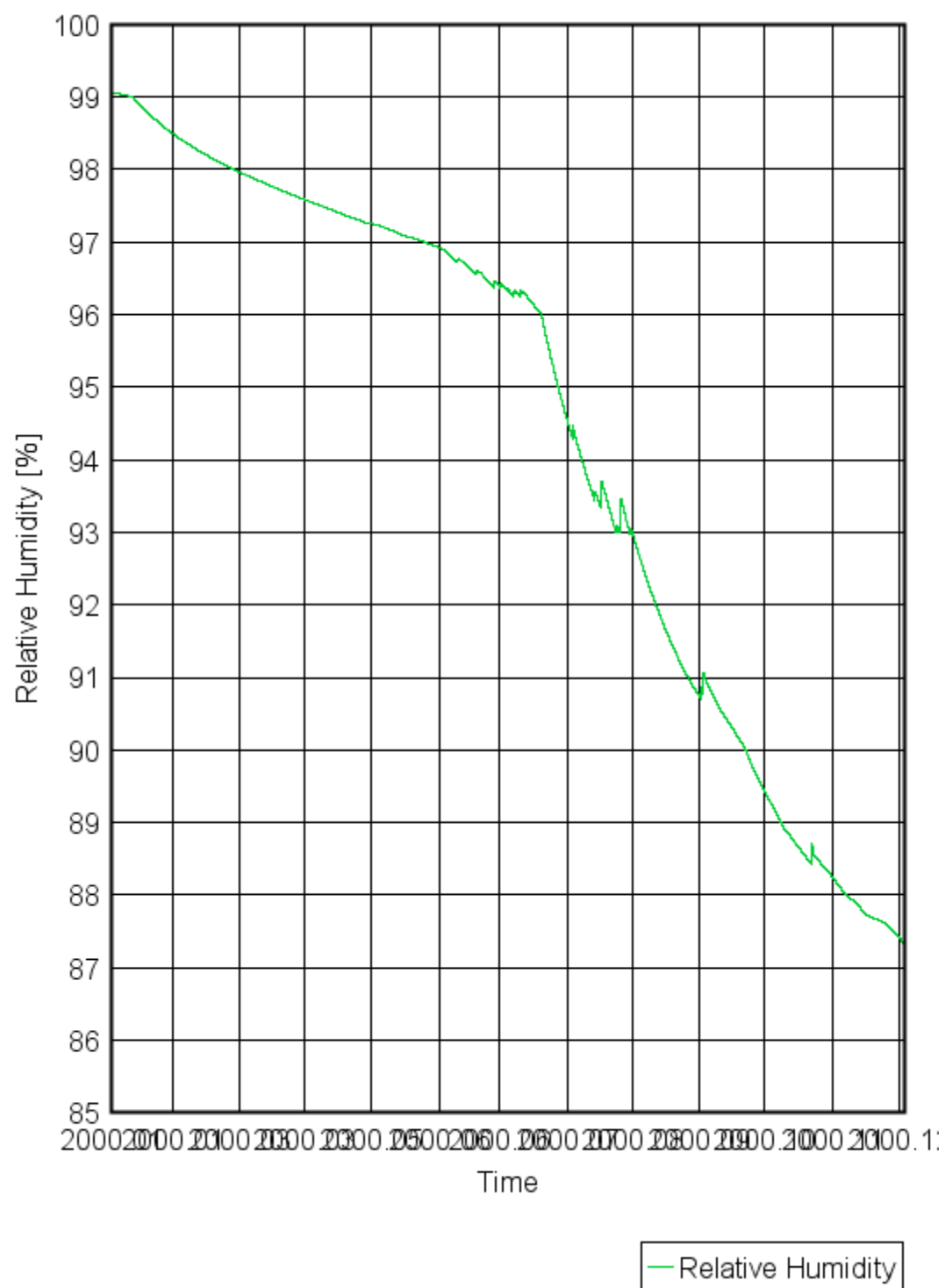
KSEINA

— Heat flux density

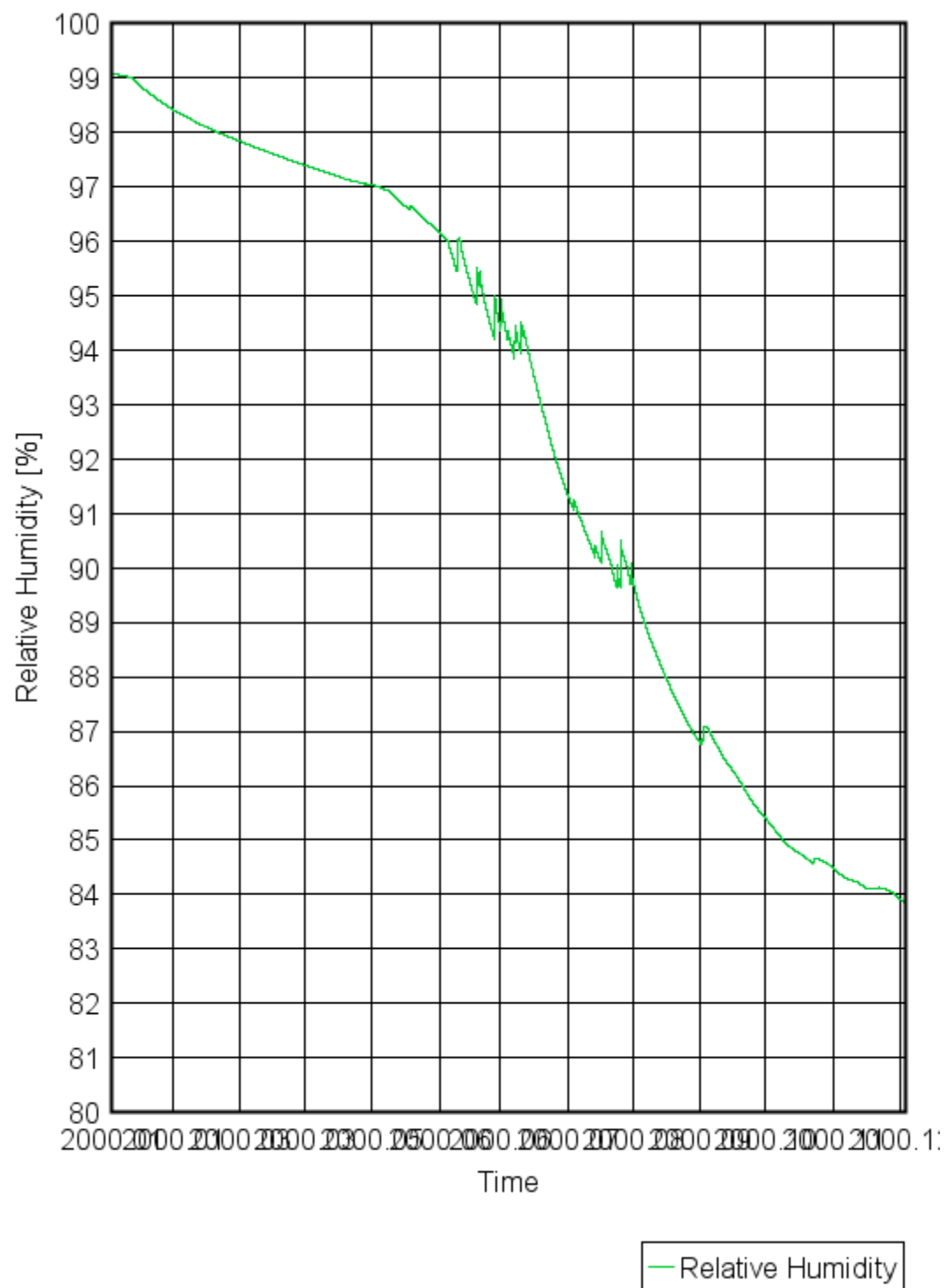
Lämpövirrat rakenteen pintojen läpi ikkunan sijaitessa sisäkuoren ulkoreunassa.

RH n.70mm syvyydessa

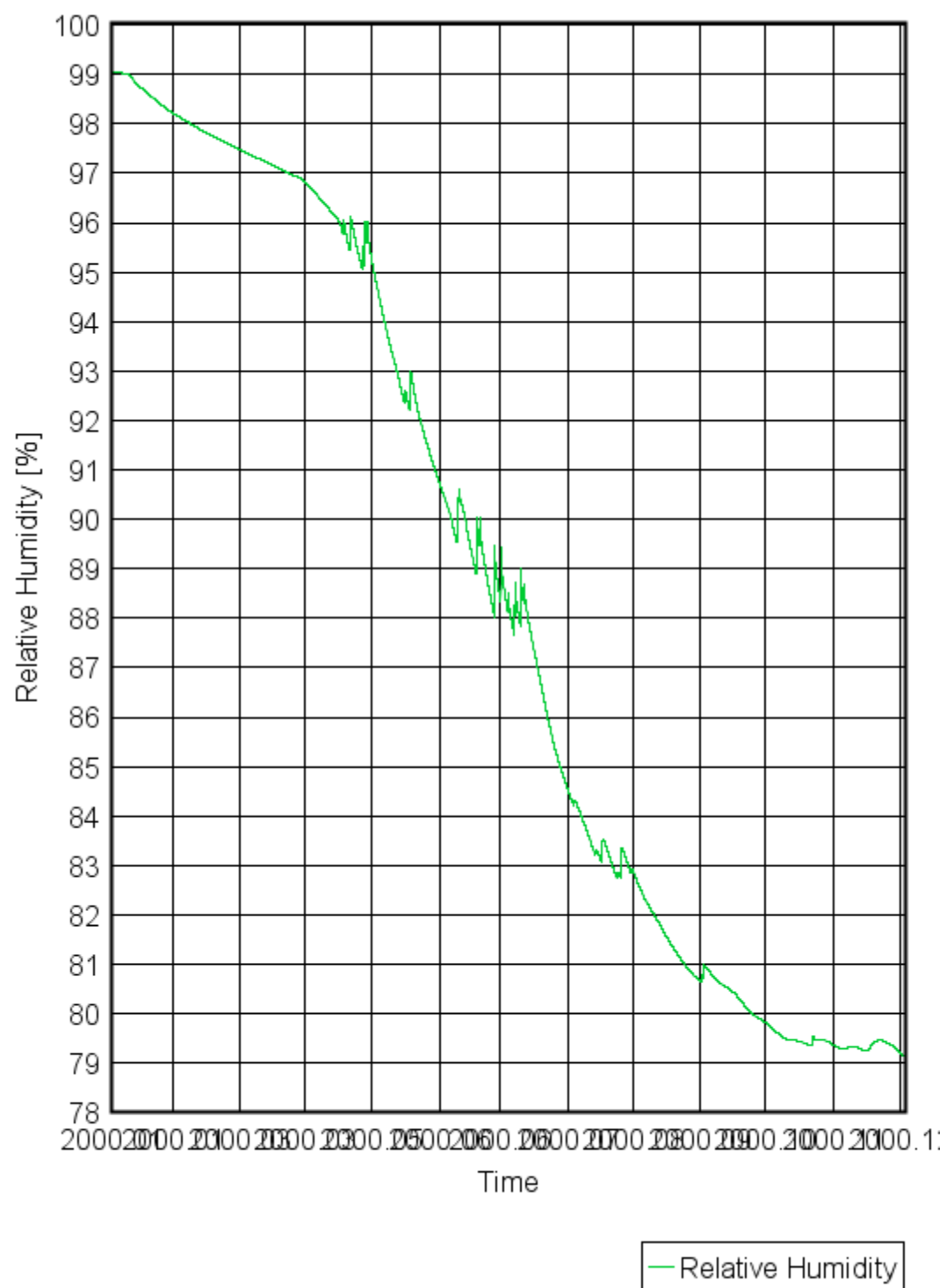
Kuivuminen olosuhteissa T20 ja RH50.

RH n.70mm syvyydessä

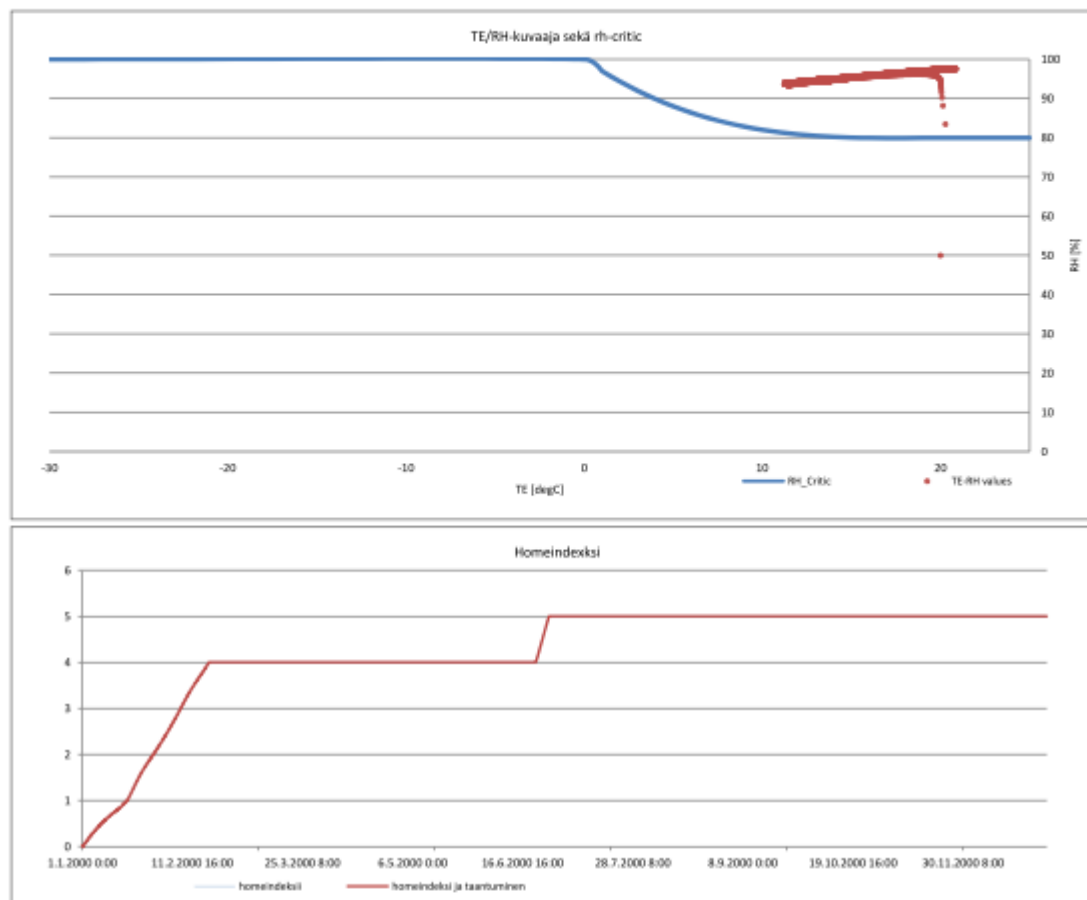
Kuivuminen olosuhteissa T25 ja RH50.

RH n.70mm syvyydessa

Kuivuminen olosuhteissa T30 ja RH50.

RH n70mm syvyydessa

Kuivuminen olosuhteissa T40 ja RH50.

**Lämpötila/kosteus pisteiden sijainti**

kriittisellä alueella

Prosentti osuus

piste alueella	100,0 %
piste alueen ulkopuolella	0,0 %

Kriittisen suhteellisen kosteuden 4 pisintä jaksoa

Jakson alkuaika	Kesto	Homeindeksi
1 1.1.2000 1:00	364 vrk, 23 h	5,0
2		
3		
4		

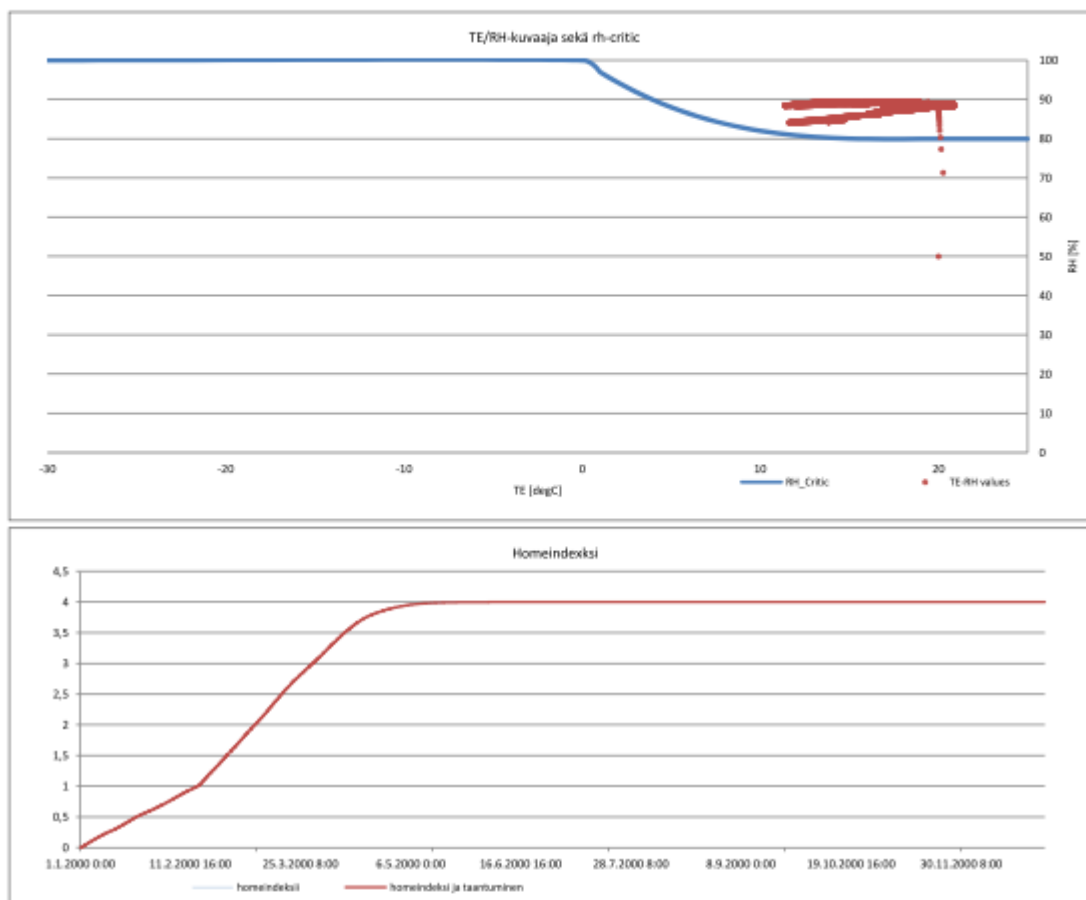
Homeindeksi

Homeindeksi

Homeindeksin nousu yhteensä	5,0
Homeindeksi taantuminen huomioituna	5,0

Silmin havaittava runsas kasvu, rihmaston peitto yli 50 % alasta

Villan homeindeksi, kun tiilimuurauksen RH 99 ja betonin RH 90.

**Lämpötila/kosteus pisteiden sijainti**

kriittisellä alueella	Prosentti osuus
piste alueella	100,0 %
piste alueen ulkopuolella	0,0 %

Kriittisen suhteellisen kosteuden 4 pisintä jaksoa

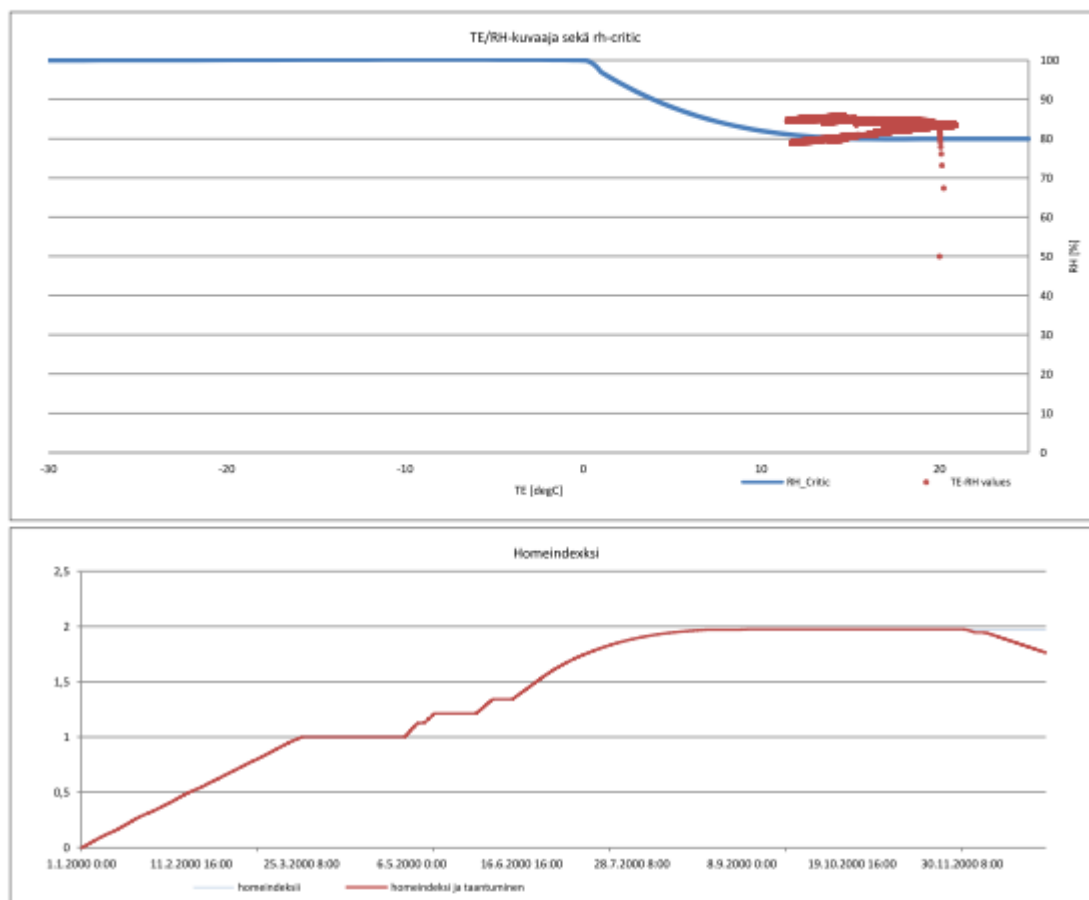
Jakson alkuaika	Kesto	Homeindeksi
1 1.1.2000 3:00	364 vrk, 21 h	4,0
2		
3		
4		

Homeindeksi

	Homeindeksi
Homeindeksin nousu yhteensä	4,0
Homeindeksi taantuminen huomioituna	4,0

Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto alle 10 % alasta (itiöitä alkaa muodostua)

Villan homeindeksi, kun tiilimuurauksen RH 95 ja betonin RH 85.

**Lämpötila/kosteus pisteiden sijainti**

kriittisellä alueella	Prosentti osuus
piste alueella	92,4 %
piste alueen ulkopuolella	7,6 %

Kriittisen suhteellisen kosteuden 4 pisintä jaksoa

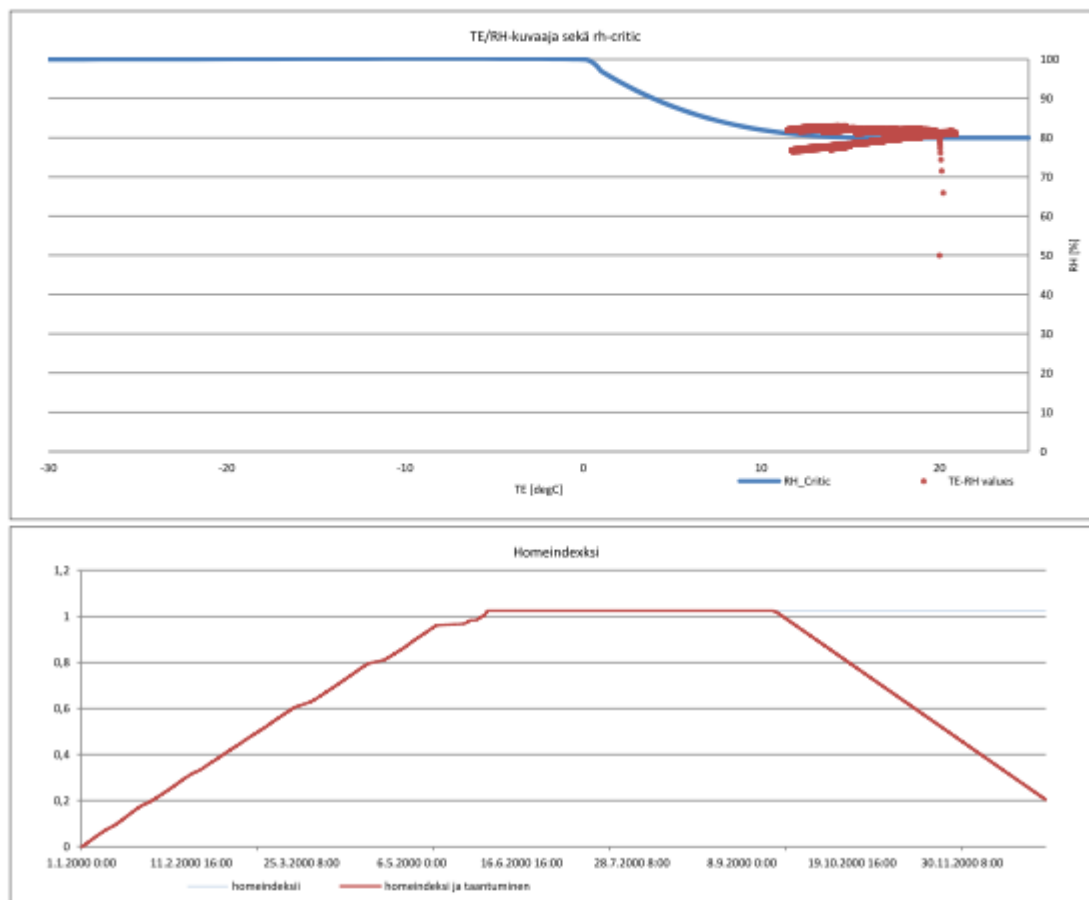
	Jakson alkuaika	Kesto	Homeindeksi
1	1.1.2000 7:00	333 vrk, 18 h	2,0
2	5.12.2000 9:00	3 vrk, 11 h	0,0
3			
4			

Homeindeksi

	Homeindeksi
Homeindeksin nousu yhteensä	2,0
Homeindeksi taantuminen huomioituna	1,8

Mikroskoopilla havaittava kasvu, paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma

Villan homeindeksi, kun tiilimuurauksen RH 90 ja betonin RH 85.

**Lämpötila/kosteus pisteiden sijainti**

kriittisellä alueella	Prosentti osuus
piste alueella	71,6 %
piste alueen ulkopuolella	28,4 %

Kriittisen suhteellisen kosteuden 4 pisintä jaksoa

Jakson alkuaika	Kesto	Homeindeksi
1 1.1.2000 11:00	261 vrk, 10 h	1,0
2		
3		
4		

Homeindeksi

	Homeindeksi
Homeindeksin nousu yhteensä	1,0
Homeindeksi taantuminen huomioituna	0,2

Ei kasvua, pinta puhdas

Villan homeindeksi, kun tiilimuurauksen RH 85 ja betonin RH 85.